

VALIDAÇÃO DA MODELAÇÃO DE UM EDIFÍCIO DE HABITAÇÃO COM O PROGRAMA ENERGYPLUS POR COMPARAÇÃO COM MEDIÇÕES “*IN SITU*”

KATIA SUSANA AFONSO GOMES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

JANEIRO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus pais e ao Tiago por
Sempre Acreditarem em Mim.

O Único Lugar onde Sucesso vem antes do Trabalho é no Dicionário.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Dr. Nuno Manuel Monteiro Ramos, pela ajuda, disponibilidade, simpatia, incentivo, compreensão, paciência e apoio incondicional que disponibilizou neste trabalho. Gostaria igualmente agradecer pela proposta do tema, pois nunca pensei que poderia adquirir tanto conhecimento e gosto num trabalho como este.

Ao Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pelos equipamentos disponibilizados e por facultar os dados da Estação Meteorológica do LFC para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Tiago, pelo amor, compreensão, apoio e carinho. Por estar sempre presente ao meu lado, não só ao longo deste trabalho mas como também ao longo de todos estes anos.

À Patricia Silva, pela ajuda incondicional, apoio académico mas sobretudo pelo apoio moral. Por estar sempre disponível para mim, quer que seja para assuntos académicos ou pessoais.

Aos meus pais e ao meu irmão por acreditarem em mim e por estarem sempre presentes no meu coração, apesar de a distância nos afastar. Obrigada por me terem dado a oportunidade de seguir os meus sonhos.

À Joana Pinto e ao Eng. Albino pela ajuda e apoio.

Aos meus amigos, pelo apoio.

A todas as pessoas que não referi mas que ajudaram de uma maneira ou de outra a que este trabalho se realizasse.

Obrigada a todos, do fundo do meu coração!

RESUMO

O trabalho desenvolvido nesta dissertação permitiu adquirir conhecimentos básicos sobre a utilização do programa de simulação higratérmica, o EnergyPlus.

Para aprendizagem do programa, foi estudado um exemplo simples, o caso 900FF do método BEStest. Nesse estudo, é explicado como é feita a introdução dos dados no programa, explicando o significado dos campos a preencher, justificando as opções tomadas.

Para validação da modelação de uma habitação em estudo, é necessário comparar os resultados da simulação com medições “In Situ”. Assim sendo, procedeu-se à colocação de sensores HOBO para a medição da temperatura e humidade relativa na habitação.

A modelação da habitação em estudo foi semelhante à modelação do caso 900FF, seguindo os mesmos passos de preenchimento no programa.

Para se proceder à simulação no EnergyPlus, é necessário um ficheiro climático. Esse ficheiro climático foi criado a partir de medições obtidas pela Estação Meteorológica do LFC.

O uso de um ficheiro climático com dados obtidos através de uma estação meteorológica permite simular o comportamento higratérmico de uma habitação de forma real, ou seja, o comportamento simulado será o mais próximo possível do comportamento observado.

Tendo o ficheiro climático, procedeu-se à simulação do caso em estudo, obtendo os resultados da temperatura e humidade relativa para as zonas térmicas da habitação.

Procedeu-se à comparação de resultados. As comparações envolveram as medições “In Situ” com as medições da Estação Meteorológica e medições “In Situ” com os resultados da simulação.

Uma análise de sensibilidade foi feita sobre a variação de dois parâmetros. Esta análise permitiu demonstrar como a variação de alguns parâmetros influencia os resultados da simulação.

PALAVRAS-CHAVE: Comportamento higratérmico, Simulação, Medições “In Situ”, EnergyPlus, Envolvente.

ABSTRACT

The work in this dissertation would acquire basic knowledge about the use of hygrothermal simulation program, the EnergyPlus.

For learning the program, the author studied a simple example, the case method 900FF BEStest. In this study, it is explained how the data is input in the program, explaining the meaning of the fields to be completed, justifying the choices made.

To validate the modeling of a housing study, it is necessary to compare the results of simulation with measurements "In Situ". Therefore, the placements of HOBO sensors were preceded for measuring temperature and relative humidity in the dwelling.

The modeling of housing study was similar to the modeling of the case 900FF, following the same steps to complete the program.

To make the simulation in EnergyPlus, a climate file is needed. This weather file was created from measurements obtained by the Meteorological Station of LFC.

The use of a file with climatic data obtained from a weather station permit simulates the hygrothermal behavior of a dwelling in a real way, i.e., the behavior will be simulated as close to the observed behavior.

With this climate file the simulation case study was preceded, having obtained the results of temperature and relative humidity for the thermal areas, of the house.

The results were compared. The comparisons included measurements "In Situ" with measurements of the meteorological station and measurements "In Situ" with the results of the simulation.

A sensitivity analysis was made on the variation of two parameters. This analysis allowed to demonstrate how the variation of some parameters have influence in the results of the simulation.

KEYWORDS: Hygrothermal Behaviour, Simulation, Measurements "In Situ", EnergyPlus, Surroundings.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJECTIVOS	2
1.3. DIVISÃO E ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	2
2. ESTUDO DO PROGRAMA ENERGYPLUS	5
2.1. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA ENERGYPLUS	5
2.2. APRESENTAÇÃO DO MÉTODO BESTEST	6
2.2.1. DESCRIÇÃO DO BESTEST	6
2.2.2. DESCRIÇÃO DO CASO BESTEST – 900FF	6
2.3. APRENDIZAGEM COM O CASO 900FF DO BESTEST	8
2.3.1. INTRODUÇÃO AO PROGRAMA ENERGYPLUS	8
2.3.2. INTERFACE DO EP-LAUNCH	9
2.3.3. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	11
2.3.4. LOCALIZAÇÃO DO EDIFÍCIO	11
2.3.5. PARÂMETROS DE SOMBREAMENTO	12
2.3.6. DEFINIÇÃO DO INTERVALO DE TEMPO E DO PERÍODO DE SIMULAÇÃO	12
2.3.7. CARACTERÍSTICAS DO SOLO	13
2.3.8. DEFINIÇÃO DE <i>SCHEDULE</i> DE FUNCIONAMENTO	14
2.3.9. DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS OPACOS	16
2.3.10. DEFINIÇÃO DOS ENVIDRAÇADOS	17
2.3.11. CONSTRUÇÃO DAS CAMADAS DOS ELEMENTOS	18
2.3.12. REGRAS GEOMÉTRICAS PARA CONSTRUÇÃO DA EDIFICAÇÃO	19
2.3.13. ZONAS TÉRMICAS	19
2.3.14. COORDENADAS DOS ELEMENTOS OPACOS	21
2.3.15. COORDENADAS DOS ENVIDRAÇADOS	21
2.3.16. GANHOS INTERNOS	22

2.3.17. DEFINIÇÃO DA INFILTRAÇÃO	23
2.3.18. ESCOLHA DE <i>OUTPUTS</i>	24
2.4. SIMULAÇÃO	24
2.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	27
2.6. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	28

3. ESTUDO DE UM CASO REAL

31

3.1. DESCRIÇÃO DA OBRA EM ESTUDO

31

3.2. DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

35

3.2.1. PAREDES EXTERIORES PISO 0

36

3.2.2. PAREDES EXTERIORES PISO 1

38

3.2.3. PAREDE DE SEPARAÇÃO DA HABITAÇÃO ADJACENTE

40

3.2.4. PAREDES INTERIORES

41

3.2.5. PAVIMENTOS

41

3.2.6. COBERTURA

42

3.2.7. ENVIDRAÇADOS

43

3.2.8. CLARABÓIAS

44

3.3. INTRODUÇÃO DOS DADOS NO ENERGYPLUS

45

3.3.1. LOCALIZAÇÃO DO EDIFÍCIO.

45

3.3.2. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

46

3.3.3. CARACTERÍSTICAS DO SOLO

46

3.3.4. DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS OPACOS

47

3.3.5. DEFINIÇÃO DOS ENVIDRAÇADOS

47

3.3.6. DEFINIÇÃO DAS ZONAS TÉRMICAS

48

3.3.7. CONDIÇÕES FRONTEIRAS DOS ELEMENTOS OPACOS

49

3.3.8. DEFINIÇÃO DA VENTILAÇÃO

52

3.3.9. GANHOS INTERNOS

54

3.3.10. DEFINIÇÃO DOS *OUTPUTS*

54

3.3.11. NOTA FINAL

55

4. MEDIÇÕES “IN SITU” E DADOS CLIMÁTICOS

57

4.1. MEDIÇÕES “IN SITU” ATRAVÉS DE SENSORES DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA ...

57

4.1.1. DESCRIÇÃO SUMÁRIA DOS APARELHOS DE MEDIÇÃO

57

4.1.2. CONFIGURAÇÃO DOS SENSORES	57
4.1.3. COLOCAÇÃO DOS SENSORES	58
4.1.4. RECOLHA DE DADOS	60
4.2. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES	61
4.2.1. RESULTADOS PARA O AMBIENTE EXTERIOR.....	61
4.2.2. RESULTADOS PARA O PISO 0 (ZONA 1)	62
4.2.3. RESULTADOS PARA O PISO 1 (ZONA 2)	63
4.2.4. RESULTADOS PARA O QUARTO 5 (ZONA 3).....	65
4.2.5. NOTA FINAL.....	66
4.3. DADOS CLIMÁTICOS	66
4.3.1. FICHEIRO CLIMÁTICO ANUAL DO TIPO TMY	66
4.3.2. FICHEIRO CLIMÁTICO <i>REAL-TIME WEATHER</i>	67
4.3.3. DADOS CLIMÁTICOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DA FEUP.....	68
4.3.4. COMPARAÇÃO DAS MEDIÇÕES "IN SITU" COM AS MEDIÇÕES DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA	71
4.4. CRIAÇÃO DO FICHEIRO CLIMÁTICO	73
 5. RESULTADOS, COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO	 77
5.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO CASO EM ESTUDO	77
5.1.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO: ERROS E AVISOS	77
5.1.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	78
5.2. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	80
5.2.1. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O PISO 0.....	80
5.2.2. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O PISO 1.....	82
5.2.3. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O QUARTO 5	85
5.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	87
5.3.1. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE: VENTILAÇÃO NATURAL.....	87
5.3.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE: FACTOR SOLAR.....	91
5.3.2. NOTA FINAL SOBRE A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	93
5.4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM DIVERSOS FICHEIROS CLIMÁTICOS.....	93
 6. CONCLUSÕES	 95
6.1. CONCLUSÕES GERAIS.....	95
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Modelo geométrico do caso 900FF	7
Fig.2 – EP-LAUNCH.....	9
Fig.3 – Ficheiro <i>Minimal</i>	10
Fig.4 – Interface do <i>IDF Editor</i>	10
Fig.5 – Grupo <i>Simulation Control</i>	11
Fig.6 – Grupo <i>Building</i>	11
Fig.7 – Grupo <i>Shadow Calculation</i>	12
Fig.8 – Grupo <i>Timestep</i>	12
Fig.9 – Grupo <i>RunPeriod</i>	13
Fig.10 – Grupo <i>Site:GroundTemperature:BuildingSurface</i>	14
Fig.11 – Grupo <i>ScheduleTypeLimits</i>	14
Fig.12 – Grupo <i>Schedule:Compact</i>	15
Fig.13 – Grupo <i>Material</i>	16
Fig.14 – Grupo <i>Material:NoMass</i>	16
Fig.15 – Grupo <i>WindowMaterial:Glazing</i>	17
Fig.16 – Grupo <i>WindowMaterial:Gas</i>	17
Fig.17 – Grupo <i>WindowMaterial:SimpleGlazingSystem</i>	18
Fig.18 – Grupo <i>Construction</i> com envidraçado por camada	18
Fig.19 – Grupo <i>Construction</i> com envidraçado como sistema	18
Fig.20 – Grupo <i>GlobalGeometryRules</i>	19
Fig.21 – Esquema das regras para introduzir coordenadas	19
Fig.22 – Grupo <i>Zone</i>	20
Fig.23 – Origem, Norte Verdadeiro e Norte Relativo	20
Fig.24 – Grupo <i>BuildingSurface:Detailed</i>	21
Fig.25 – Grupo <i>FenestrationSurface:Detailed</i>	22
Fig.26 – Grupo <i>OtherEquipment</i>	22
Fig.27 – Grupo <i>ZoneInfiltration:DesignFlowRate</i>	23
Fig.28 – Grupo <i>Output:Variable</i>	24
Fig.29 – Interface do EP-LAUNCH.....	25
Fig.30 – Janela de avisos de simulação	25
Fig.31 – Janela do <i>Quick Panel</i>	26

Fig.32 – Janela de relatórios de avisos e erros.....	26
Fig.33 – Modelo geométrico em ficheiro CAD.....	27
Fig.34 – Temperatura máxima proveniente dos diversos programas.....	29
Fig.35 – Temperatura mínima proveniente dos diversos programas.....	29
Fig.36 – Localização da moradia em estudo.....	31
Fig.37 – Fachada com envidraçados orientada a Sudoeste - Foto	32
Fig.38 – Fachada com envidraçados orientada a Sudoeste - Esquema	32
Fig.39 – Fachada Nordeste - Esquema.....	33
Fig.40 – Fachada Nordeste - Foto.....	33
Fig.41 – Fachada Noroeste	33
Fig.42 – Fachada Sudeste - Entrada para a habitação.....	34
Fig.43 – Planta do piso 0 (Rês-do-chão).....	34
Fig.44 – Planta do piso 1	35
Fig.45 – Planta da cobertura	35
Fig.46 – Parede exterior Tipo 1	36
Fig.47 – Parede exterior Tipo 2	37
Fig.48 – Parede exterior Tipo 3	37
Fig.49 – Parede exterior Tipo 4	38
Fig.50 – Parede exterior inclinada triangular Tipo 5.....	39
Fig.51 – Parede exterior inclinada rectangular Tipo 5.....	39
Fig.52 – Parede de separação da habitação adjacente.....	40
Fig.53 – Parede interior	41
Fig.54 – Pavimento piso 0 e 1	41
Fig.55 – Cobertura.....	42
Fig.56 – Envidraçado situado à Nordeste da sala de estar, piso 0.....	43
Fig.57 – Localização do envidraçado Nordeste do piso 0.....	43
Fig.58 – Envidraçados da sala e dos quartos orientados à Sudoeste	44
Fig.59 – Clarabóia rectangular	44
Fig.60 – Definição da localização da habitação	45
Fig.61 – Definição do período de simulação	46
Fig.62 – Definição das caixas-de-ar	47
Fig.63 – Zona 1.....	48
Fig.64 – Zona 2 e Zona 3	48

Fig.65 – Definição das zonas	49
Fig.66 – Definição das condições fronteiras dos elementos	50
Fig.67 – <i>Zone and Surface Condition</i>	51
Fig.68 – Grupo <i>ZoneVentilation</i>	52
Fig.69 – Abertura para ventilação natural	54
Fig.70 – <i>Outputs</i>	54
Fig.71 – Sensor HOBO	57
Fig.72 – Colocação dos sensores no piso 0	58
Fig.73 – Colocação dos sensores no piso 1	58
Fig.74 – Colocação do sensor 14 no piso 0	59
Fig.75 – Colocação do sensor 15 no exterior	60
Fig.76 – Gráfico de temperatura para o ambiente exterior	61
Fig.77 – Gráfico de humidade relativa para o ambiente exterior.	62
Fig.78 – Gráfico de temperatura para o piso 0.	62
Fig.79 – Gráfico de temperatura para o piso 1.	63
Fig.80 – Gráfico de humidade relativa interior para o piso 1.	64
Fig.81 – Gráfico de temperatura para o quarto 5	65
Fig.82 – Gráfico de temperatura para o quarto 5 e o quarto intermédio.....	65
Fig.83 – Dados existentes num ficheiro climático do EnergyPlus.	67
Fig.84 – Vista geral da estação meteorológica.	68
Fig.85 – Piranómetro – Medição da radiação solar.	69
Fig.86 – Sensor de temperatura e humidade relativa	69
Fig.87 – Anemómetro – Medição da velocidade e/ou força do vento.....	69
Fig.88 – Cata-Vento – Medição da orientação do vento.....	70
Fig.89 – Pluviómetro – Medição da precipitação.	70
Fig.90 – Pirgeómetro – Medição da radiação terrestre e atmosférica.	70
Fig.91 – Sistema de aquisição de dados.	71
Fig.92 – Medições horárias da temperatura entre a estação e o sensor 15.	71
Fig.93 – Medições horárias da humidade relativa entre a estação e o sensor 15.	72
Fig.94 – Comparação de pressão de vapor entre a estação e o sensor 15.....	73
Fig.95 – Resultados da simulação quanto a erros e avisos.	77
Fig.96 – Modelo geométrico do caso em estudo – Alçado Sudoeste.....	78
Fig.97 – Modelo geométrico do caso em estudo – Alçado Nordeste	78

Fig.98 – Resultados da simulação para as diferentes zonas térmicas	79
Fig.99 – Comparação de resultados da temperatura para o piso 0	80
Fig.100 – Comparação de Novembro para Dezembro para o piso 0	81
Fig.101 – Frequências acumuladas da temperatura para o piso 0	81
Fig.102 – Comparação de resultados da temperatura para o piso 1	82
Fig.103 – Comparação de Novembro a Dezembro para o piso 1	83
Fig.104 – Frequências acumuladas da temperatura para o piso 1	83
Fig.105 – Comparação de resultados da humidade relativa para o piso 1	84
Fig.106 – Frequências acumuladas da humidade relativa para o piso 1	84
Fig.107 – Comparação de pressão de vapor para o piso 1	85
Fig.108 – Comparação de resultados da temperatura para o quarto 5	86
Fig.109 – Frequências acumuladas da temperatura para o quarto 5	86
Fig.110 – Resultados da temperatura para o piso 0 e com RPH=1,2.....	88
Fig.111 – Resultados da temperatura para o piso 1 e com RPH=1,2.....	88
Fig.112 – Resultados da temperatura para o quarto 5 e com RPH=1,2.....	89
Fig.113 – Resultados da temperatura para o piso 0 e com RPH=2.....	90
Fig.114 – Resultados da temperatura para o piso 1 e com RPH=2.....	90
Fig.115 – Resultados da temperatura para o quarto 5 e com RPH=2	91
Fig.116 – Resultados da temperatura para o piso 0 e com g=0,5	92
Fig.117 – Resultados da temperatura para o piso 1 e com g=0,5	92
Fig.118 – Resultados da temperatura para o quarto 5 e com g=0,5.....	93
Fig.119 – Resultados de uma simulação com ficheiros climáticos vs medições	94

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Materiais - Paredes	7
Quadro 2 – Materiais - Pavimento.....	7
Quadro 3 – Materiais - Tecto.....	7
Quadro 4 – Características dos envidraçados	8
Quadro 5 – Resultados da simulação	27
Quadro 6 – Resultados BEStest	28
Quadro 7 – Parede Tipo 1	36
Quadro 8 – Parede Tipo 2.....	37
Quadro 9 – Parede Tipo 3.....	38
Quadro 10 – Parede Tipo 4.....	38
Quadro 11 – Parede Tipo 5.....	40
Quadro 12 – Parede de separação	40
Quadro 13 – Parede interior.....	41
Quadro 14 – Pavimento	42
Quadro 15 – Cobertura	42
Quadro 16 – Características dos envidraçados	43
Quadro 17 – Características da clarabóia.....	45

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

λ – Condutibilidade térmica [W/m.K]

U – Coeficiente de transmissão térmica [W/m².K]

R – Resistência térmica [m².K/W]

C_p – Calor específico [J/kg.K]

e – Espessura [m]

ρ – Densidade [kg/m³]

RPH – Taxa de Renovação Horária [h⁻¹]

HR – Humidade Relativa [%]

P_s – Pressão de Saturação [Pa]

P_v – Pressão de Vapor [Pa]

T – Temperatura [°C]

T_d – Temperatura Ponto de Orvalho [°C]

I_i – Intensidade da Radiação Directa Normal [Wh/m²]

I_{gh} – Intensidade da Radiação Global em Superfície Horizontal [Wh/m²]

I_{dh} – Intensidade da Radiação Difusa em Superfície Horizontal [Wh/m²]

g – Factor Solar

IDF – Ficheiro de Inputs do programa EnergyPlus

EPW – Ficheiro climático utilizado pelo EnergyPlus

TMY – Typical Meteorological Year

DOE – The Department of Energy

BLAST – Building Loads Analysis and System Thermodynamics

BESTest – Building Energy Simulation test

IEA – International Energy Agency

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

ANSI – American National Standards Institute

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LFC – Laboratório de Física das Construções

LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Actualmente, o conforto térmico é uma das principais preocupações do Projectista. Essa preocupação tem sido cada vez maior desde que os projectos de térmica têm de apresentar valores não superiores ao permitido pelo RCCTE (*Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*) [1].

Para respeitar os valores impostos pelo regulamento, o Projectista tem de adoptar e dimensionar os materiais e equipamentos envolvidos no conforto térmico. Uma das ferramentas usadas é um software de simulação do comportamento térmico. Esta ferramenta é particularmente útil para o Projectista observar o comportamento térmico de uma habitação com os materiais e equipamentos a usar em obra ou então testar soluções alternativas que podem se adequar melhor na obra.

Uma das preocupações no uso deste tipo de programa é saber se os resultados obtidos são fiáveis. Para tal, diversos programas foram testados com base numa norma. Os resultados obtidos pelos diversos programas foram divulgados, permitindo aos utilizadores desses mesmos programas avaliar o nível de precisão do software utilizado.

Outra forma de avaliar a precisão de um programa é através de medições “*In Situ*”. Com ajuda de sensores que se encontravam distribuídos pela habitação, foi possível saber a temperatura e a humidade relativa presente nessa habitação. Com base nesses valores obtidos, procedeu-se a comparação de resultados com os resultados obtidos pela simulação do comportamento higratérmico dessa mesma habitação.

A primeira fase deste trabalho permitiu adquirir noções básicas sobre a manipulação do software de simulação do comportamento higratérmico, o EnergyPlus, e validar os conhecimentos adquiridos com base em resultados divulgados sobre o teste deste mesmo software conforme uns exercícios de aplicação apresentados numa norma específica.

A segunda fase permitiu comparar e validar os resultados obtidos pelo programa com os resultados obtidos através das medições “*In Situ*” realizadas numa habitação unifamiliar em fase de acabamentos.

1.2. OBJECTIVOS

O trabalho desenvolvido nesta dissertação tem como principal objectivo a validação da modelação de um edifício de habitação unifamiliar com o programa EnergyPlus por comparação de medições “*In Situ*”.

Para atingir esse objectivo, foi definido vários objectivos parciais para à sua concretização:

- Exploração do EnergyPlus como ferramenta de simulação higratérmica;
- Validação do estudo com base na simulação de um exercício simples, comparando os resultados com referências bibliográficas;
- Obtenção de medições “*In Situ*” da temperatura e humidade relativa de uma habitação unifamiliar;
- Modelação da habitação unifamiliar no EnergyPlus;
- Criação de um ficheiro climático do EnergyPlus com base em medições obtidas a partir da Estação Meteorológica do LFC;
- Comparação dos resultados obtidos através das medições “*In Situ*” com a simulação da habitação unifamiliar;
- Análise de sensibilidade para alguns parâmetros da modelação do edifício.

1.3. DIVISÃO E ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos:

- O Capítulo 1 permite enquadrar o presente trabalho e apresentar os objectivos a atingir;
- O Capítulo 2 apresenta o programa utilizado e o exemplo para estudo e aprendizagem do programa. Este capítulo permite explicar o funcionamento do programa e mostrar como o utilizador tem de preencher campo a campo os dados relativos à introdução de dados para o exemplo proposto. Neste capítulo é apresentado os resultados dos diversos programas envolvidos no teste para o exercício proposto, fazendo por fim uma análise crítica quanto aos resultados obtidos;
- O Capítulo 3 apresenta um caso real de uma habitação unifamiliar em fase de acabamentos. É aqui feita uma apresentação da habitação e a descrição da mesma e dos materiais que a compõem. Este capítulo permite mostrar a introdução dos dados nos respectivos campos do programa necessários para executar a simulação, explicando e justificando as opções tomadas;
- O Capítulo 4 envolve as medições no local através de dispositivos ou sensores que medem a humidade relativa e a temperatura do ar. É referido a localização, implementação e monitorização desses mesmos sensores. É apresentado as medições da temperatura e humidade relativa das zonas térmicas em estudo, discutindo de forma geral, o seu resultado. Procede-se à comparação das medições obtidas em obra com as medições obtidas pela estação meteorológica. Neste capítulo é referido os diversos tipos de ficheiros climáticos existentes, bem como os dados que contém um ficheiro climático. É criado, a partir de um ficheiro climático anual, outro ficheiro climático com os dados facultados pela Estação Meteorológica da FEUP para a simulação de um caso em estudo;
- O Capítulo 5 trata da simulação propriamente dita do caso em estudo e da comparação dos resultados: simulação *versus* medições. É apresentado os resultados, comentando-os, da temperatura e humidade relativa para as 3 zonas térmicas de uma habitação

unifamiliar. É feita uma pequena análise de sensibilidade sobre a variação de dois parâmetros que influenciam os resultados da simulação;

- O Capítulo 6, por fim, trata das conclusões gerais tiradas ao longo deste trabalho.

2

ESTUDO DO PROGRAMA ENERGYPLUS

2.1. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA ENERGYPLUS

Nos últimos anos, tem aumentado a preocupação com a qualidade do ar e do conforto térmico das edificações. Sendo a certificação energética obrigatória, torna-se cada vez mais importante a realização de um bom projecto de térmica e de ventilação a fim de obter a melhor classificação energética possível. Um projecto bem elaborado e completo permite igualmente excluir potenciais patologias nos edifícios.

Sendo assim, cabe ao Projectista dimensionar e adoptar soluções construtivas adequadas. Para tal, o Projectista tem ao seu alcance ferramentas informáticas de simulação do comportamento higrotérmico.

Uma dessas ferramentas disponíveis no mercado é o software EnergyPlus. Este programa, desenvolvido por DOE (*The Department of Energy*) nos Estados Unidos, tem as suas raízes nos programas BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e DOE-2, ambos desenvolvidos no final dos anos 70 e início dos anos 80 [2].

O EnergyPlus é uma das ferramentas de simulação higrotérmica mais utilizadas, pois permite estimar trocas térmicas, ganhos solares, temperaturas e humidades relativas nos compartimentos e nas superfícies dos elementos construtivos e consumos de energia [3]. Este programa permite igualmente dimensionar sistemas AVAC.

Para executar uma simulação, o EnergyPlus necessita que o utilizador introduza dados de entrada (*Inputs*) relativamente à descrição e constituição do edifício, bem como um ficheiro climático. Este ficheiro climático, designado por *Weather file*, descreve o meio ambiente que rodeia a edificação.

Uma das vantagens de utilizar o EnergyPlus é que este software é gratuito, podendo ser descarregado a partir do site [4].

É de referir que, para esta dissertação, foi utilizada a versão 4.0.0.024 lançado em 12 de Outubro de 2009.

Apresenta-se nos subcapítulos seguintes uma descrição das funcionalidades do programa com o apoio de um exemplo simples.

2.2. APRESENTAÇÃO DO MÉTODO BESTEST

2.2.1. DESCRIÇÃO DO BESTEST

O método BEStest (*Building Energy Simulation test*), promovida pela IEA (*International Energy Agency*), surgiu devido à dificuldade de validar programas de simulação [5].

Este método permite ao utilizador simular diferentes casos, permitindo avaliar o nível de precisão do programa utilizado. Para o utilizador avaliar esse nível de precisão, este terá que comparar os seus resultados.

Assim sendo, o método BEStest, que se baseia numa análise comparativa, permite ao utilizador comparar os resultados obtidos, através das simulações dos casos, com os resultados divulgados de diversos programas de simulação ou de versões diferentes do mesmo programa para os mesmos casos apresentados pelo BEStest [5].

A ASHRAE Standard 140 (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) adoptou o método BEStest como norma para validação de programas de simulação de desempenho térmico. Esta norma apresenta a descrição detalhada de cada um dos casos e apresenta os resultados obtidos através da utilização de diversos programas [5].

Os casos descritos pela norma encontram-se divididos em 4 grupos distintos [5]:

- *Low Mass* (construções leves);
- *High Mass* (construções pesadas);
- *Free-Float* (sem sistemas mecânicos de aquecimento/arrefecimento do ar);
- *In-Depth* (análise mais aprofundada do comportamento térmico do edifício).

Dentro de cada grupo, são ainda apresentados casos para simulação em que são tidos em conta diversos aspectos, tais como [6]:

- Elementos de sombreamento (palas horizontais/verticais);
- Mudança de orientação dos envidraçados;
- Acréscimo de uma zona térmica;
- Ventilação nocturna.

2.2.2. DESCRIÇÃO DO CASO BESTEST – 900FF

É apresentado a seguir o modelo geométrico do exercício escolhido e as suas principais características. Estes dados são fornecidos pela norma [6]:

- *Dimensões*: 8 m x 6 m x 2,7 m;
- *Envidraçados*: 2 x (3 m x 2 m), orientados a Sul;
- *Localização*: Denver (Colorado - USA), altitude: 1609 m, latitude: 39,8° Norte, longitude: 104,9° Oeste;
- *Terreno*: plano, sem obstáculos e situado exactamente na estação meteorológica;
- *Infiltração*: 0,5 RPH;
- *Ganhos internos*: 200 W contínuos, 60% radiativo, 40% convectivo, 100% sensível.

A Fig.1 indica o modelo geométrico do exercício.

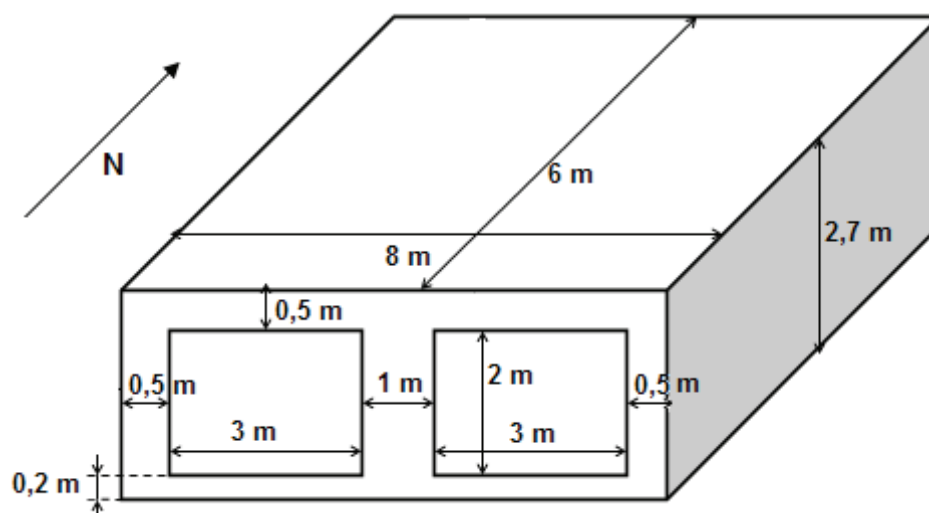


Fig.1 – Modelo geométrico do caso 900FF.

Do Quadro 1 ao Quadro 4 apresentam-se para cada elemento opaco os materiais e as suas propriedades. A ordem apresentada dos materiais é do exterior para o interior do modelo geométrico:

Quadro 1 – Materiais – Paredes.

Elemento	λ [W/m.K]	Espessura [m]	R [m ² .K/W]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Alvenaria de Blocos de Betão	0,510	0,100	0,196	1400	1000
Isolamento Térmico	0,040	0,0615	1,537	10	1400
Revestimento em Madeira	0,140	0,009	0,064	530	900

Quadro 2 – Materiais – Pavimento.

Elemento	λ [W/m.K]	Espessura [m]	R [m ² .K/W]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Laje de Betão Armado	1,130	0,080	0,071	1400	1000
Isolamento Térmico	0,040	1,007	25,175		

Quadro 3 – Materiais – Tecto.

Elemento	λ [W/m.K]	Espessura [m]	R [m ² .K/W]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Placas de Gesso Cartonado	0,160	0,010	0,063	950	840
Isolamento Térmico	0,040	0,1118	2,794	12	840
Revestimento em Madeira	0,140	0,019	0,136	530	900

Quadro 4 – Características dos envidraçados.

Propriedades do Envidraçado	
Coeficiente de Extinção	0,0196/mm
Número de Vidros	2
Espessura do Vidro	3,175 mm
Espaço de Ar entre Vidros	13 mm
Índice de Refracção	1,526
Transmissão Normal da Radiação Directa através de um Vidro	0,86156
Condutibilidade Térmica do vidro	1,06 W/m.K
Conductância de cada Vidro	333 W/m ² .K
Coeficiente Combinado de Transferência por Radiação e Convecção da Caixa-de-Ar	6,297 W/m ² .K
Coeficiente de Transferência Exterior Combinado	21,00 W/m ² .K
Coeficiente de Transferência Interior Combinado	8,29 W/m ² .K
U – Coeficiente de Transmissão Térmica	3,0 W/m ² .K
Emitância do Vidro	0,9
Densidade do Vidro	2500 kg/m ³
Calor Específico	750 J/kg.K
Dispositivo de Sombreamento Interior	Nenhum
Sombreamento do Vidro Duplo para Incidência Normal	0,907
Factor Solar do Vidro	0,789

2.3. APRENDIZAGEM COM O CASO 900FF DO BESTEST

Nesta dissertação é simulado um dos casos do BESTest, o caso 900FF (*free floating*), para aprendizagem e validação do programa EnergyPlus.

A escolha do caso 900FF baseia-se nas semelhanças com o modelo construtivo do caso real que é apresentado no Capítulo 3 desta dissertação, tendo em conta incluir elementos opacos massivos e pelo facto de não dispor de sistema de climatização operacional.

2.3.1. INTRODUÇÃO AO PROGRAMA ENERGYPLUS

Nesta secção é apresentada a interface do programa, que inclui os campos para introdução dos dados de entrada (*Inputs*) do exemplo.

A simulação do exemplo (caso 900FF) serve para apresentar e explicar os campos presentes no programa e permite mostrar como os dados têm de ser preenchidos, justificando as opções tomadas.

Uma vez que o programa apresenta uma interface com numerosos campos, só se referem aqueles que são necessários para correr a simulação do caso em estudo.

2.3.2. INTERFACE DO EP-LAUNCH

O primeiro passo é então abrir o programa EP-LAUNCH do EnergyPlus, em *Programas* do menu *Iniciar* do *Windows* na pasta *EnergyPlus V4-0 Programs*.

Após o lançamento do EP-LAUNCH, observa-se o seguinte:

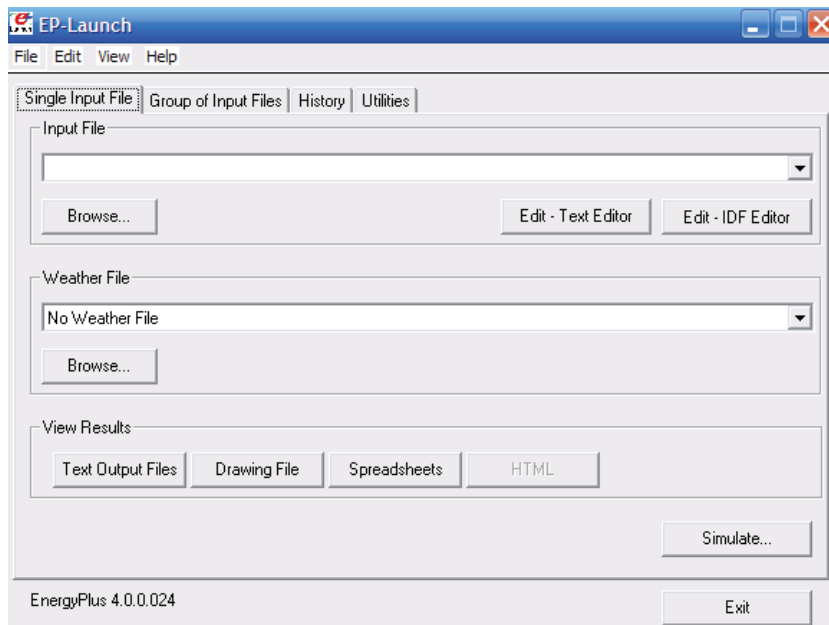


Fig.2 – EP-LAUNCH.

Observa-se pela Fig.2, os seguintes grupos:

- *Input File*;
- *Weather File*;
- *View Results*.

O *Input File*, como o nome o indica, é um ficheiro para entrada de dados (*Inputs*) e é designado por ficheiro *IDF*.

O *Weather File* é um ficheiro do tipo *EPW* que contém informações climáticas sobre o local onde se encontra a edificação.

O *View Results* é o grupo de apresentação de resultados. Neste grupo, é possível apresentar os dados de saída (*Outputs*) em ficheiro do tipo *Texto* (Bloco de Notas), clicando em *Text Output Files*. Estes ficheiros do tipo *Texto* contêm informações sobre a simulação, se houve erros e de que tipos. Neste grupo é possível apresentar o modelo geométrico num ficheiro do tipo *CAD* clicando em *Drawing File*. Por fim, é possível igualmente apresentar os resultados da simulação num ficheiro *Excel*.

Para começar a introduzir os *Inputs*, é necessário abrir um ficheiro base. Este ficheiro, denominado por *Minimal.idf*, é um ficheiro com o mínimo de dados possíveis afim de poder correr uma simulação e está incluído na pasta *ExampleFiles* do programa EnergyPlus.

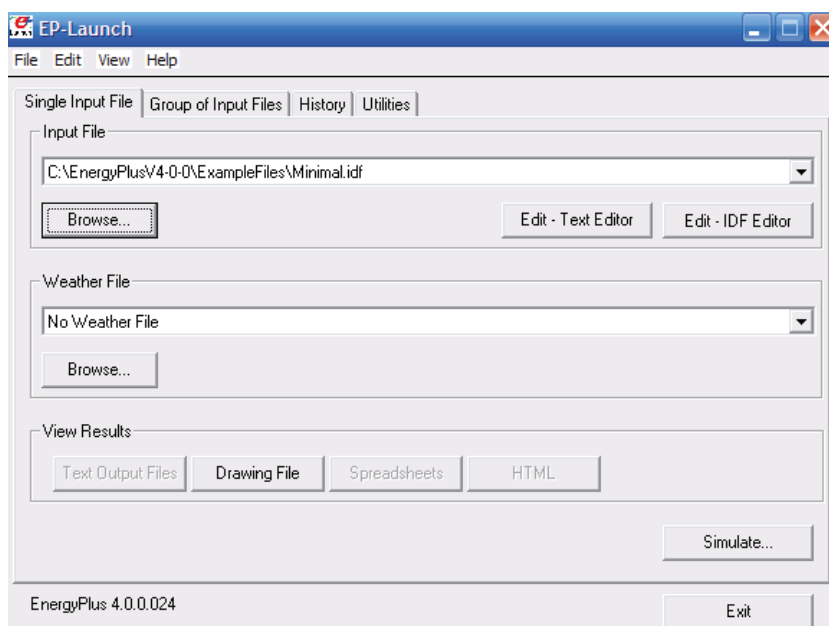


Fig.3 – Ficheiro *Minimal*.

Tendo o *Minimal*, clicar em *Edit – IDF Editor*. Aparece então a janela seguinte:

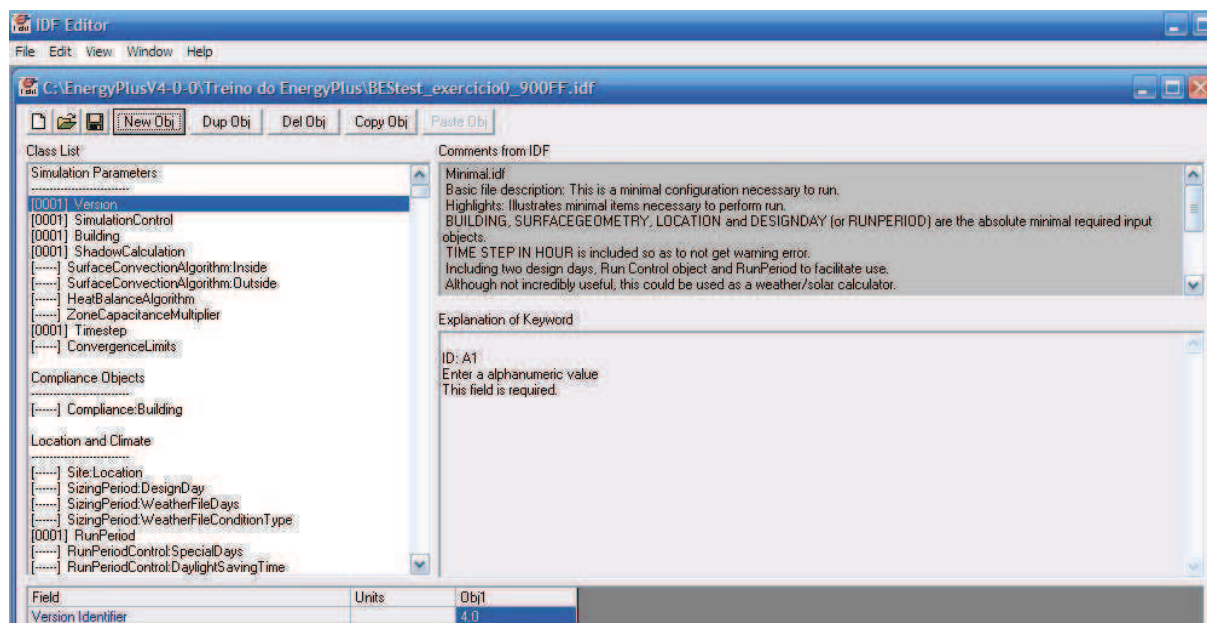


Fig.4 – Interface do *IDF Editor*.

É possível observar uma lista de campos à esquerda da janela. Para cada campo seleccionado, é apresentado à direita da lista um comentário bem como uma explicação sobre o campo em questão.

Analisa-se de seguida cada grupo da lista apresentada na Fig.4.

Para preenchimento dos dados, são apresentados os campos da lista pela ordem seguida pela interface do programa.

2.3.3. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

O grupo **Simulation Control** diz respeito aos parâmetros de simulação.

Este grupo permite definir o tipo de simulação pretendida, isto é, permite definir como o EnergyPlus vai executar a simulação. O utilizador pode optar por executar uma simulação de um caso em estudo, para observação do seu comportamento segundo o seu dimensionamento ou optar por executar uma simulação para cálculos de dimensionamento. A simulação pode ser anual ou por um determinado período de tempo.

No caso 900FF pretende-se uma simulação anual de um ficheiro climático, sendo a opção escolhida o *Run Simulation for Weather File Run Periods* como *Yes*. Como não se pretende fazer cálculos de dimensionamento mas observar o comportamento do edifício para um período anual, as restantes opções são definidas como *No*.

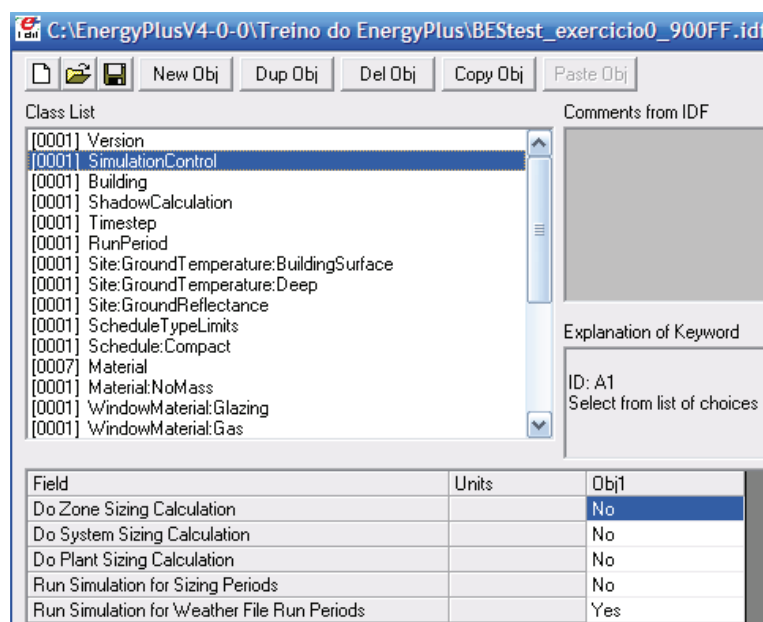


Fig.5 – Grupo *Simulation Control*.

2.3.4. LOCALIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

O grupo **Building** refere-se à localização do edifício:

Field	Units	Obj1
Name		exercicio0
North Axis	deg	0
Terrain		Country
Loads Convergence Tolerance Value		0,04
Temperature Convergence Tolerance Value	deltaC	0,004
Solar Distribution		FullInteriorAndExterior
Maximum Number of Warmup Days		25

Fig.6 – Grupo *Building*.

O primeiro campo permite dar um nome ao edifício, neste caso nomeou-se por *exercício0*. O nome fica ao critério do utilizador.

São aqui importantes 3 campos que o utilizador tem de preencher:

- *North Axis* (ângulo entre o edifício e o Norte verdadeiro);
- *Terrain* (características do terreno, ou seja, se está em meio urbano, rural, etc.);
- *Solar Distribution* (distribuição solar no interior de uma zona).

O ângulo entre o edifício e o Norte verdadeiro é 0°. É tomado este valor pela orientação da edificação em relação ao Norte (ver Fig.1). Pois este valor é o ângulo, medido em planta, entre o Norte verdadeiro (ou Norte Geográfico) e a fachada Norte da edificação.

Quanto às características do terreno, é considerado a opção *Country* uma vez que é dito no subcapítulo 2.2.2. que o terreno se encontra numa zona plana e sem obstáculos.

Para o campo *Solar distribution* há que ter em conta o tipo de distribuição solar que incide no modelo geométrico. Para este caso específico, escolheu-se a opção *Full Interior and Exterior*. O significado desta opção é que toda a radiação incidente é absorvida pelo pavimento e pelas paredes e que qualquer sombreamento existente é causado por elementos exteriores, tais como palas e varandas.

Os restantes campos deste grupo são deixados os valores por defeito, uma vez que só utilizadores mais experientes têm sensibilidade sobre os valores que podem adoptar.

2.3.5. PARÂMETROS DE SOMBREAMENTO

O grupo ***Shadow Calculation*** refere-se a algoritmos de sombreamento:

Field	Units	Obj1
Calculation Frequency		1
Maximum Figures in Shadow Overlap Calculations		

Fig.7 – Grupo *Shadow Calculation*.

Este grupo requer conhecimentos mais avançados sobre o programa e como é necessário ter alguma sensibilidade sobre o valor a determinar, é usado o valor adoptado segundo o documento *Energy Plus Testing With Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE 140-2007* desenvolvido pela equipa *EnergyPlus Development Team* [6].

2.3.6. DEFINIÇÃO DO INTERVALO DE TEMPO E DO PERÍODO DE SIMULAÇÃO

Para visualizar resultados de uma simulação, é especificado qual o intervalo de tempo que é apresentado esses mesmos resultados. O grupo ***Timestep*** define isso mesmo:

Field	Units	Obj1
Number of Timesteps per Hour		4

Fig.8 – Grupo *Timestep*.

O intervalo pretendido é de 15 minutos e para tal, o número adoptado é 4.

O grupo **RunPeriod** permite definir o período de simulação tendo como base um ficheiro climático:

Field	Units	Obj1
Name		
Begin Month		1
Begin Day of Month		1
End Month		12
End Day of Month		31
Day of Week for Start Day		UseWeatherFile
Use Weather File Holidays and Special Days		No
Use Weather File Daylight Saving Period		No
Apply Weekend Holiday Rule		No
Use Weather File Rain Indicators		Yes
Use Weather File Snow Indicators		Yes
Number of Times Runperiod to be Repeated		1

Fig.9 – Grupo *RunPeriod*.

Neste grupo indica-se o período que se pretende simular e o tipo de dados a ter em consideração.

Começa-se por inserir a data de início e fim da simulação. Aqui pretende-se fazer uma simulação anual, introduzindo então o período de 1 de Janeiro a 31 de Dezembro.

O campo *Day of Week for Start Day* permite dizer em que dia da semana começa a simulação. Aqui é alterado para *UseWeatherFile*. Esta opção permite dizer que o dia da semana começa segundo o ficheiro climático.

Os restantes campos seguintes são definidos de maneira a que o programa não faça diferenciação entre feriados, férias e dias especiais. O ficheiro climático pode conter dados específicos para feriados, férias, etc. No entanto pede-se que tenha em consideração a pluviosidade e a neve, caso exista no ficheiro climático.

Especifica-se igualmente o número de vezes (geralmente é o número de anos) em que a simulação é repetida.

2.3.7. CARACTERÍSTICAS DO SOLO

O grupo **Site:GroundTemperature:BuildingSurface** indica qual a temperatura superficial do solo.

Este campo é utilizado por todos os elemento construtivos que estão em contacto com o solo, neste caso, o pavimento.

Aqui é possível definir a temperatura para cada mês do ano.

Field	Units	Obj1
January Ground Temperature	C	18
February Ground Temperature	C	18
March Ground Temperature	C	18
April Ground Temperature	C	18
May Ground Temperature	C	18
June Ground Temperature	C	18
July Ground Temperature	C	18
August Ground Temperature	C	18
September Ground Temperature	C	18
October Ground Temperature	C	18
November Ground Temperature	C	18
December Ground Temperature	C	18

Fig.10 – Grupo *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*.

Sendo este valor desconhecido, é adoptado o valor sugerido pelo programa, ou seja, 18°C. O programa adopta esse valor para todos os meses do ano.

2.3.8. DEFINIÇÃO DE *SCHEDULE* DE FUNCIONAMENTO

O grupo *ScheduleTypeLimits* é auxiliar ao *Schedule:Compact*.

As *Schedules*, como o nome o indica, são agendamentos. Estas são definidas para representar padrões de uso e operações da edificação e dos seus sistemas, ou seja, definir o período de utilização do sistema de iluminação, definir o controlo das temperaturas de sistemas de condicionamento de ar, definir a infiltração, etc. [7]

Field	Units	Obj1
Name		Any Number
Lower Limit Value		
Upper Limit Value		
Numeric Type		

Fig.11 – Grupo *ScheduleTypeLimits*.

Para preencher o *Schedule:Compact*, é necessário preencher o *ScheduleTypeLimits* primeiro. O seu preenchimento depende do tipo de *Schedule* que se pretende. Neste exercício, existe infiltração de ar. Essa infiltração é feita de forma natural sem qualquer intervenção de dispositivos mecânicos.

Sabendo que há infiltração de ar, é preenchido o campo *Name* com o nome de *Any Number*. Este nome é escolhido pelo utilizador, pelo que este pode nomear este campo como bem entender. Aqui, simplesmente decidiu-se identificar a *Schedule* como *Any Number*, o que significa Qualquer Número em português.

Os campos *Lower Limit Value* e *Upper Limit Value* referem-se a definição de um valor mínimo e máximo. Só utilizadores experientes podem definir o intervalo pretendido. Neste caso, como só existe infiltração sem a intervenção de meios mecânicos, não é necessário definir um intervalo para o agendamento, deixando então estes campos em branco.

O campo *Numeric Type* não necessita ser preenchido uma vez que não se preencheu os limites. Este campo permite definir o seguinte:

- *Continuous* (contínuo);
- *Discrete* (discreto).

Este campo permite especificar como é feito a validação do intervalo definido, ou seja, a escolha *Continuous* permite o uso de valores inteiros ou fraccionais do intervalo, enquanto o *Discrete* permite unicamente o uso de valores inteiros do intervalo. Como não há intervalo definido, este campo é deixado igualmente em branco.

O grupo ***Schedule:Compact*** permite definir o agendamento das *Schedules*, ou seja, se houver um sistema mecânico, pode-se definir o intervalo de tempo (data e horário de funcionamento) em que o equipamento entra em funcionamento.

Field	Units	Obj1
Name		SchInfiltration
Schedule Type Limits Name		Any Number
Field 1		Through:12/31
Field 2		For:alldays
Field 3		Until:24:00
Field 4		1
Field 5		

Fig.12 – Grupo *Schedule:Compact*.

Neste grupo é-lhe definido um nome. Por opção, é-lhe chamado *SchInfiltration*.

No campo seguinte, é definido a *Schedule* com valores limites impostos anteriormente. Neste caso, seleccionar a *Schedule* criada – *Any Number*.

Tendo infiltração de ar e sendo algo que não pode ser controlado aqui por meios mecânicos, é definido da seguinte maneira:

- Through: 12/31
Data final da *Schedule*. Como é pretendido uma simulação anual, a *Schedule* vai até dia 31 de Dezembro;
- For: Alldays
Define quais os dias da semana em que é aplicado a *Schedule*. Neste caso, há infiltração todos os dias pelo que é preenchido o campo com *Alldays*;
- Until: 24:00
Indica até que hora a *Schedule* funciona, ou seja, como a infiltração é ao longo do dia, define-se que o período de funcionamento é até as 24h do dia;
- 1
Indica o valor da *Schedule* para o intervalo de horas definido no campo acima. O valor 1 indica que 100% das horas da taxa nominal de infiltração ocorre até as 24h [7].

Tendo este grupo definido, é mostrado no subcapítulo 2.3.17 como é quantificada essa infiltração.

2.3.9. DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS OPACOS

O grupo **Material** permite a definição dos materiais e suas características:

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		ConcreteBlock	FoamInsulation	WoodSiding	ConcreteSlab	Plasterboard	FiberglassQuilt	Roofdeck
Roughness		VeryRough	MediumRough	MediumRough	VeryRough	VeryRough	MediumRough	MediumRough
Thickness	m	0,1	0,0615	0,009	0,08	0,01	0,1118	0,019
Conductivity	W/m-K	0,51	0,04	0,14	1,13	0,16	0,04	0,14
Density	kg/m3	1400	10	530	1400	950	12	530
Specific Heat	J/kg-K	1000	1400	900	1000	840	840	900
Thermal Absorptance		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Solar Absorptance		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Visible Absorptance		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

Fig.13 – Grupo **Material**.

No primeiro campo deste grupo serve para nomear o material que se pretende usar para a simulação. Aqui é dado o nome do próprio material.

Neste grupo são definidos as características dos materiais. Uma delas é a rugosidade do material. Não sendo fornecida essa informação, adoptou-se que os materiais exteriores dos elementos são de alta rugosidade (*Very Rough*) e que os materiais são de rugosidade média (*Medium Rough*). Este parâmetro afecta o cálculo do coeficiente de transporte por convecção.

Para os campos relacionados com a espessura (*Thickness*), condutibilidade (*Conductivity*), densidade (*Density*) e o calor específico (*Specific Heat*), ver informação dos Quadros 1 a 3 para preenchimento destes campos.

Os valores dos últimos 3 campos são definidos como 0,9 e 0,6. Estes valores são sugeridos pelo documento *Energy Plus Testing With Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE 140-2007* [6].

O grupo **Material:NoMass** permite definir os materiais em que apenas é conhecida a sua resistência térmica (R) e para todos os materiais que não acumulam calor na sua massa. Este grupo é geralmente utilizado para os isolantes térmicos, pois estes geralmente contribuem pouco para a inércia térmica.

Field	Units	Obj1
Name		Insulation
Roughness		MediumRough
Thermal Resistance	m2-K/W	25,175
Thermal Absorptance		0,9
Solar Absorptance		0,6
Visible Absorptance		0,6

Fig.14 – Grupo **Material:NoMass**.

Tal como no grupo anterior adoptou-se que os materiais exteriores aos elementos são de alta rugosidade (*Very Rough*) e que os materiais são de rugosidade média (*Medium Rough*). Aqui só tendo o isolamento como material intermédio, é escolhido a rugosidade média.

Para a resistência térmica do material, ver valor no Quadro 2.

Neste grupo, tal como no anterior, são definidos os últimos campos baseando-se no documento [6].

2.3.10. DEFINIÇÃO DOS ENVIDRAÇADOS

O grupo **WindowMaterial:Glazing** permite definir as características dos envidraçados.

Este grupo permite a inserção das características do vidro:

Field	Units	Obj1
Name		GlassType1
Optical Data Type		SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name		
Thickness	m	0,003175
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,86156
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,07846
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,07846
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,91325
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,082
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,082
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84
Conductivity	W/m-K	1,06
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance		
Solar Diffusing		

Fig.15 – Grupo **WindowMaterial:Glazing**.

Este grupo permite introduzir características muito específicas dos vidros.

O BESTest fornece características específicas dos envidraçados, mas para o uso do programa EnergyPlus, os dados fornecidos estão incompletos. O documento *Energy Plus Testing With Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE 140-2007* adopta os valores em falta [6].

O grupo **WindowMaterial:Gas** permite definir o tipo de gás presente nos vidros duplos.

Field	Units	Obj1
Name		AirSpaceResistance
Gas Type		Air
Thickness	m	0,013
Conductivity Coefficient A	W/m-K	
Conductivity Coefficient B	W/m-K2	
Viscosity Coefficient A	g/m-s	
Viscosity Coefficient B	g/m-s-K	
Specific Heat Coefficient A	J/kg-K	
Specific Heat Coefficient B	J/kg-K2	
Molecular Weight		

Fig.16 – Grupo **WindowMaterial:Gas**.

Este grupo é preenchido quando o envidraçado é duplo. Aqui só é necessário especificar o tipo de gás presente entre os painéis de vidro e indicar o espaço existente entre os painéis.

É de referir que, com a versão 4.0.0.024 do EnergyPlus, é possível introduzir os dados dos envidraçados de uma maneira mais simplificada, pois nem sempre os fabricantes de envidraçados fornecem as características completas do vidro. Com esta nova versão, basta ter o valor do coeficiente de transmissão térmica – U e o factor solar do vidro. Assim, com este novo grupo, o programa considera o envidraçado como um todo, não sendo necessário decompor por camada.

O grupo *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem* permite definir um envidraçado como um todo.

Field	Units	Obj1
Name		Glass
U-Factor	W/m2-K	3
Solar Heat Gain Coefficient		0,789
Visible Transmittance		0,86156

Fig.17 – Grupo *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem*.

Como referido acima, este é outra solução de introduzir os envidraçados. É uma solução simplificada mas não chega, segundo o manual do programa, a ser tão rigoroso como a introdução das camadas em separado. Refere-se, mais uma vez, que é uma óptima alternativa na ausência de mais dados.

Aqui nesta janela é introduzido os valores do Quadro 4. O valor 3 é o coeficiente de transmissão térmica – U. O valor 0,789 corresponde ao factor solar do envidraçado e por fim, o valor 0,86156 corresponde a transmissão luminosa.

2.3.11. CONSTRUÇÃO DAS CAMADAS DOS ELEMENTOS

O grupo *Construction* permite definir as camadas dos elementos construtivos:

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		ExteriorWallSul	Floor	Roof	DoublePaneWindow	ExteriorWallNorte	ExteriorWallEste	ExteriorWallOeste
Outside Layer		WoodSiding	Insulation	Roofdeck	GlassType1	WoodSiding	WoodSiding	WoodSiding
Layer 2		FoamInsulation	ConcreteSlab	FiberglassQuilt	AirSpaceResistance	FoamInsulation	FoamInsulation	FoamInsulation
Layer 3		ConcreteBlock		Plasterboard	GlassType1	ConcreteBlock	ConcreteBlock	ConcreteBlock
Layer 4								

Fig.18 – Grupo *Construction* com envidraçado por camada.

Aqui constrói-se cada elemento por camada, começando pela camada exterior até a camada interior. Cada objecto é denominado pelo nome do elemento construtivo em que faz parte.

As camadas são especificadas nos Quadros 1 a 4.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		ExteriorWallSul	Floor	Roof	Window	ExteriorWallNorte	ExteriorWallEste	ExteriorWallOeste
Outside Layer		WoodSiding	Insulation	Roofdeck	Glass	WoodSiding	WoodSiding	WoodSiding
Layer 2		FoamInsulation	ConcreteSlab	FiberglassQuilt		FoamInsulation	FoamInsulation	FoamInsulation
Layer 3		ConcreteBlock		Plasterboard		ConcreteBlock	ConcreteBlock	ConcreteBlock
Layer 4								

Fig.19 – Grupo *Construction* com envidraçado como sistema.

Aqui, tal como na Fig.18, cada elemento é construído por camada. A única diferença aqui presente é que o envidraçado é introduzido como um único elemento.

2.3.12. REGRAS GEOMÉTRICAS PARA CONSTRUÇÃO DA EDIFICAÇÃO

O grupo **GlobalGeometryRules** permite definir as regras de construção geométrica dos elementos.

Field	Units	Obj1
Starting Vertex Position		UpperLeftCorner
Vertex Entry Direction		CounterClockWise
Coordinate System		Relative
Daylighting Reference Point Coordinate System		
Rectangular Surface Coordinate System		

Fig.20 – Grupo *GlobalGeometryRules*.

A definição dos parâmetros geométricos aquando da construção dos elementos é definida por 3 campos.

O primeiro refere-se à introdução das coordenadas de cada elemento, ou seja, convencionou-se que a primeira coordenada a introduzir deve começar num determinado vértice. Neste caso adoptou-se que o primeiro vértice é aquele que se situa no canto superior esquerdo.

A seguir define-se o sentido, ou seja, que a sequência dos vértices deve seguir um determinado sentido. Aqui adoptou-se o sentido anti-horário. Esta regra é válida quando se observa o elemento do lado exterior do edifício. Por exemplo, deve-se observar o pavimento pelo lado da cave (por baixo) e não pelo interior da zona.

Por fim, o sistema de coordenadas a escolher é o *Relative*. O que significa que cada zona possui o seu sistema de coordenadas. Esta opção é mais prática para quando se pretende “copiar” zonas existentes.

A Fig.21 esquematiza as regras para introduzir as coordenadas:

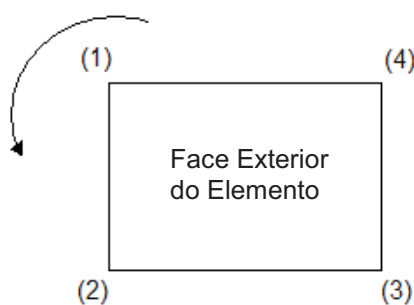


Fig.21 – Esquema das regras para introduzir coordenadas.

2.3.13. ZONAS TÉRMICAS

O grupo **Zone** permite a definição de zonas térmicas.

Field	Units	Obj1
Name		zona1
Direction of Relative North	deg	0
X Origin	m	0
Y Origin	m	0
Z Origin	m	0
Type		1
Multiplier		1
Ceiling Height	m	autocalculate
Volume	m3	autocalculate
Zone Inside Convection Algorithm		
Zone Outside Convection Algorithm		
Part of Total Floor Area		Yes

Fig.22 – Grupo Zone.

Neste grupo define-se o número de zonas térmicas.

Neste exercício, só há uma única zona uma vez que só temos um paralelepípedo convexo.

Como referido no subcapítulo 2.3.4., o ângulo entre o edifício e o Norte verdadeiro é 0° . Este ângulo é medido em planta entre a fachada Norte do edifício e o Norte verdadeiro (ou Norte Geométrico).

É ainda, no entanto, necessário definir um outro ângulo. Esse ângulo é o denominado ângulo relativo.

Esse ângulo diz respeito a rotação de uma determinada zona térmica dentro de um edifício. A Fig.23 exemplifica essa situação:

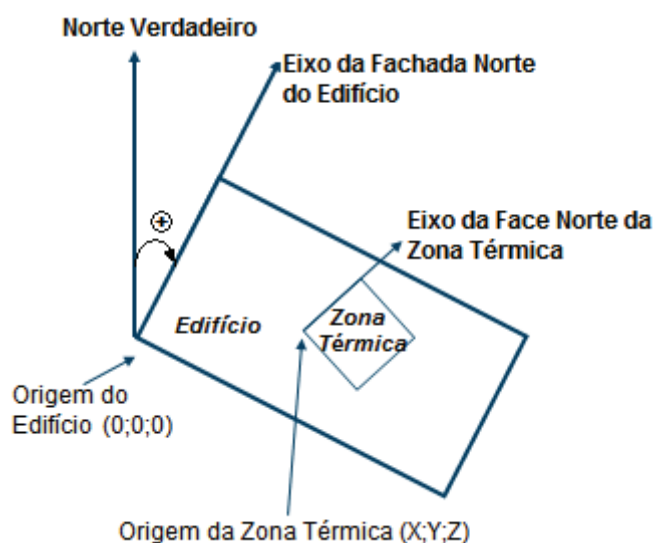


Fig.23 – Origem, Norte Verdadeiro e Norte Relativo.

Assim no caso 900FF, o ângulo do Norte relativo é 0° , pois o edifício é a zona térmica em estudo.

Adopta-se a origem (0;0;0) do edifício como exemplificado na Fig.23.

Os restantes campos são deixados por defeito.

2.3.14. COORDENADAS DOS ELEMENTOS OPACOS

O grupo ***BuildingSurface:Detailed*** permite construir as fachadas, introduzindo as coordenadas e definindo as condições fronteiras:

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		ExteriorWallNorte	ExteriorWallSul	ExteriorWallEste	ExteriorWallOeste	Roof	Floor
Surface Type		Wall	Wall	Wall	Wall	Roof	Floor
Construction Name		ExteriorWallNorte	ExteriorWallSul	ExteriorWallEste	ExteriorWallOeste	Roof	Floor
Zone Name		zona1	zona1	zona1	zona1	zona1	zona1
Outside Boundary Condition		Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Ground
Outside Boundary Condition Object							
Sun Exposure		SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	NoSun
Wind Exposure		WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	NoWind
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Number of Vertices		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Vertex 1 X-coordinate	m	0	0	8	0	0	8
Vertex 1 Y-coordinate	m	6	0	0	0	6	6
Vertex 1 Z-coordinate	m	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	0
Vertex 2 X-coordinate	m	0	0	8	0	0	8
Vertex 2 Y-coordinate	m	6	0	0	0	0	0
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	0	0	2,7	0
Vertex 3 X-coordinate	m	8	8	8	0	8	0
Vertex 3 Y-coordinate	m	6	0	6	6	0	0
Vertex 3 Z-coordinate	m	0	0	0	0	2,7	0
Vertex 4 X-coordinate	m	8	8	8	0	8	0
Vertex 4 Y-coordinate	m	6	0	6	6	6	6
Vertex 4 Z-coordinate	m	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	0

Fig.24 – Grupo *BuildingSurface:Detailed*.

De notar que aqui é preciso especificar o que corresponde cada elemento no *Surface Type*, ou seja, definir para cada elemento construtivo se este é uma parede, tecto ou pavimento.

Outro aspecto importante é especificar a zona de que o elemento construtivo faz parte, descrever as condições fronteiras dos elementos, ou seja, se estes estão em contacto com o solo, com o exterior, com espaços não aquecidos, etc. Aqui todas as paredes e o tecto estão em contacto com o exterior (*Outdoors*), enquanto o pavimento está em contacto com o solo (*Ground*).

A seguir, especificar se os elementos estão sujeitos ao sol e/ou ao vento. Aqui, todas as paredes e o tecto (face exterior dos elementos) estão sujeitos ao sol e ao vento. O pavimento, por sua vez, como está em contacto com o solo, não está sujeito ao vento nem ao sol.

Os restantes campos são deixados por defeito.

Por fim, procede-se a introdução das coordenadas de cada elemento, seguindo as regras geométricas já referidas anteriormente. Para introduzir as coordenadas foi seguido o esquema apresentado na Fig.1.

Nota: Existe uma solução alternativa de introduzir as coordenadas. A solução é, em vez de seleccionar o grupo *BuildingSurface:Detailed*, seleccionar cada grupo de cada elemento construtivo e preencher em separado. Esta alternativa é mais demorada mas pode ser prático no caso de se querer separar os elementos por categoria, ou seja, por paredes, tectos, pavimentos, etc.

2.3.15. COORDENADAS DOS ENVIDRAÇADOS

O grupo ***FenestrationSurface:Detailed*** permite introduzir as coordenadas dos envidraçados.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		SulWindowEq	SulWindowDir
Surface Type		Window	Window
Construction Name		DoublePaneWindow	DoublePaneWindow
Building Surface Name		ExteriorWallSul	ExteriorWallSul
Outside Boundary Condition Object			
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate
Shading Control Name			
Frame and Divider Name			
Multiplier		1	1
Number of Vertices		4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	0,5	4,5
Vertex 1 Y-coordinate	m	0	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	2,2	2,2
Vertex 2 X-coordinate	m	0,5	4,5
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	0
Vertex 2 Z-coordinate	m	0,2	0,2
Vertex 3 X-coordinate	m	3,5	7,5
Vertex 3 Y-coordinate	m	0	0
Vertex 3 Z-coordinate	m	0,2	0,2
Vertex 4 X-coordinate	m	3,5	7,5
Vertex 4 Y-coordinate	m	0	0
Vertex 4 Z-coordinate	m	2,2	2,2

Fig.25 – Grupo *FenestrationSurface:Detailed*.

O preenchimento deste grupo é semelhante ao anterior.

As coordenadas dos envidraçados, tal como nos materiais opacos, são introduzidas conforme o esquema apresentado na Fig.1 e segue as regras geométricas apresentadas anteriormente.

2.3.16. GANHOS INTERNOS

O grupo ***OtherEquipment*** permite definir os ganhos internos de equipamentos:

Field	Units	Obj1
Name		GanhosInternos
Zone Name		zona1
Schedule Name		SchInfiltration
Design Level Calculation Method		EquipmentLevel
Design Level	W	200
Watts per Zone Floor Area	W/m2	
Watts per Person	W/Person	
Fraction Latent		0
Fraction Radiant		0,6
Fraction Lost		0

Fig.26 – Grupo *OtherEquipment*.

No exercício em estudo é dito que há ganhos internos mas não é referido a fonte desses ganhos. Assim sendo, optou-se por escolher o grupo genérico *OtherEquipment*.

O primeiro campo serve para nomear este grupo, assim chamou-se *GanhosInternos*.

No segundo campo especifica-se a zona em que há ganhos.

Para este grupo é igualmente necessário ter uma *Schedule* definida, pois é necessário definir uma *Schedule* para os mesmos motivos que a infiltração. Os ganhos internos não têm qualquer horário definido e estes ganhos estão presentes ao longo do dia e ao longo do ano. Assim sendo, é adoptada uma igual à da infiltração (considera-se que o período de funcionamento é exactamente o mesmo), é então utilizada a *Schedule Any Number*.

Sabendo que é dado o valor em Watts (200 W) para a potência dos equipamentos, indica-se então esse valor no campo para esse efeito – *Design Level* (W). Sendo este valor associado aos equipamentos, é necessário escolher a opção *EquipmentLevel* no campo *Design Level Calculation Method*.

É dado igualmente a fracção radiante, que corresponde ao valor de 0,6.

Para as restantes fracções, é adoptada um valor nulo.

2.3.17. DEFINIÇÃO DA INFILTRAÇÃO

O grupo ***ZoneInfiltration:DesignFlowRate*** permite indicar a renovação horária para a infiltração e o fluxo de ar máximo na zona:

Field	Units	Obj1
Name		InfiltraçãoZona1
Zone Name		zona1
Schedule Name		SchInfiltration
Design Flow Rate Calculation Method		Flow/Zone
Design Flow Rate	m3/s	0,018
Flow per Zone Floor Area	m3/s-m2	
Flow per Exterior Surface Area	m3/s-m2	
Air Changes per Hour		0,5
Constant Term Coefficient		1
Temperature Term Coefficient		
Velocity Term Coefficient		
Velocity Squared Term Coefficient		

Fig.27 – Grupo *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*.

Este grupo é para definir a infiltração existente na zona. Este grupo é especificamente para toda a infiltração que não seja intencional, como o mau isolamento dos materiais, fendas ou a infiltração vinda da má estanquidade dos vãos envidraçados ou ainda a infiltração resultante do abrir e fechar de janelas e portas.

Uma vez que não é especificado o tipo de infiltração e sabendo que não há qualquer tipo de abertura para infiltração de ar, é considerado então este grupo – *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*.

Para o primeiro campo é dado um nome ao grupo, aqui é-lhe chamado de *InfiltraçãoZona1*.

No segundo campo é especificada a zona onde ocorre a infiltração.

No campo seguinte é especificada a forma como é tida em consideração a infiltração, neste caso pretende-se a opção *Flow/Zone*, ou seja o fluxo de ar por zona.

Neste exercício é dito que a renovação horária de ar é de 0,5. Com este valor, tira-se o fluxo de ar máximo na zona (*DesignFlowRate*) que é calculado da seguinte maneira:

$$DesignFlowRate = \frac{Volume \times RPH}{3600} \quad (1)$$

$$DesignFlowRate = \frac{2,7 \times 8 \times 6 \times 0,5}{3600} = 0,018 \quad (2)$$

Assim sendo, é preenchido o valor de 0,5 para as renovações horárias e o valor de 0,018 para o *DesignFlowRate*.

Os restantes campos são deixados por defeito.

2.3.18. ESCOLHA DE OUTPUTS

O grupo **Output:Variable** permite a escolha dos *Outputs* para visualização dos resultados.

Field	Units	Obj1
Key Value		*
Variable Name		Zone/Sys Air Temperature
Reporting Frequency		Hourly
Schedule Name		

Fig.28 – Grupo *Output:Variable*.

Para visualizar os resultados escolha-se o dado de saída pretendido.

Neste exercício é pedido a temperatura horária média anual para a zona em estudo, então seleccionar o *Zone/Sys Air Temperature* para uma frequência horária.

Para poder visualizar o valor médio anual mudava-se a opção para *Annual*.

Desejando observar os valores mínimos e máximos de temperatura, é preciso configurar o modo como o *Excel* apresenta os resultados. Para tal, ir ao interface do EP-LAUNCH. Ir a opção *View* (na parte superior da janela), seleccionar *Options*. Em *Miscellaneous*, activar a opção *Create Statistics File*.

2.4. SIMULAÇÃO

Tendo o ficheiro *IDF* preenchido procede-se à gravação do mesmo, podendo então a partir daí avançar para a simulação.

Antes de efectuar qualquer simulação há que ter o ficheiro climático para o caso em estudo. Para este exercício do BEStest é fornecido um ficheiro climático.

Caso se pretenda utilizar o ficheiro climático num formato utilizado pelo programa, ou seja, do tipo *EPW*, o ficheiro deve ser convertido. Para tal, basta ir à interface do EP-LAUNCH e seleccionar o separador *Utilities*. Na opção *Utility*, seleccionar *Weather* e clicar no *RunWeather*. A partir daí, basta indicar o ficheiro para a conversão e indicar o local onde se pretende guardar o novo ficheiro convertido.

Tendo o ficheiro convertido, procede-se finalmente à sua simulação.

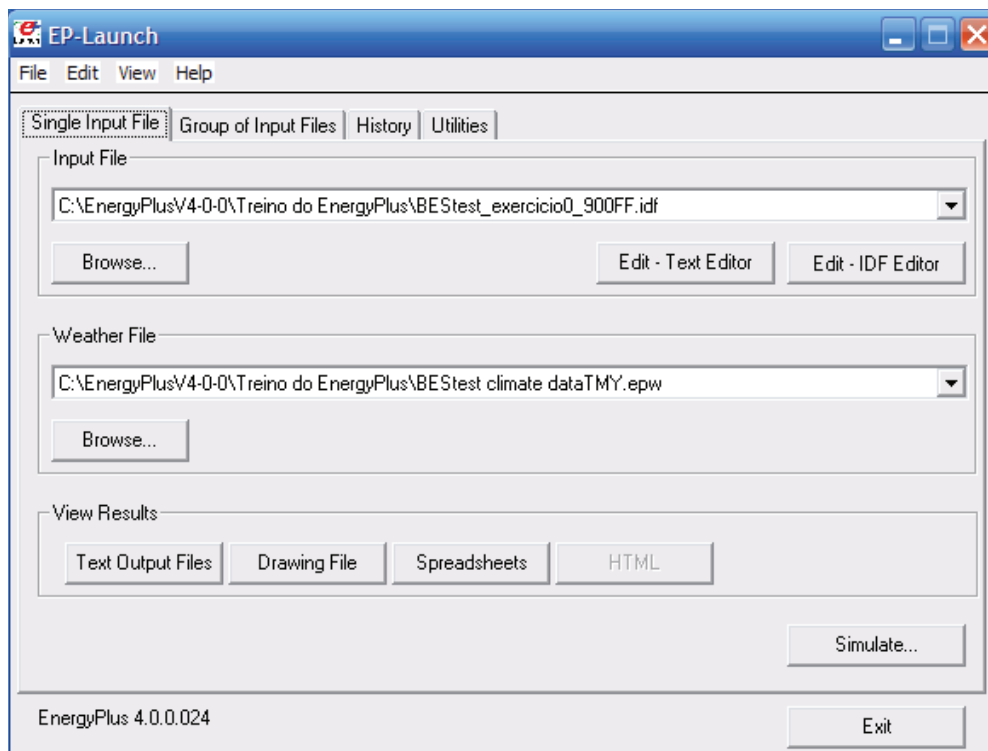


Fig.29 – Interface do EP-LAUNCH.

Carrega-se então em *Simulate*. Após uns segundos, é apresentado uma janela do tipo:

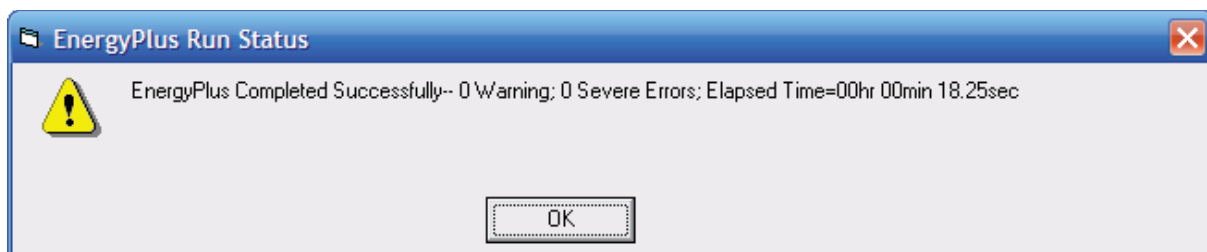


Fig.30 – Janela de avisos de simulação.

Esta janela apresenta os erros e avisos ocorridos durante a simulação. Neste caso não houve avisos nem erros.

Podem ocorrer durante uma simulação, 3 tipos de erros:

- *Warning* – simples aviso, podendo ser resolvido;
- *Severe* – grave, tendo que ser resolvido;
- *Fatal* – A simulação é anulada.

Pode visualizar-se o relatório de erros, seleccionando *Text Output File* na interface do EP-LAUNCH ou ainda seleccionar a opção *ERR* do *Quick Panel*:

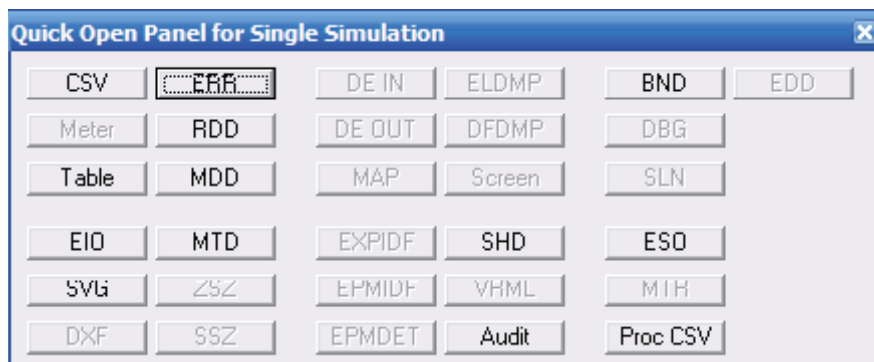


Fig.31 – Janela do Quick Panel.

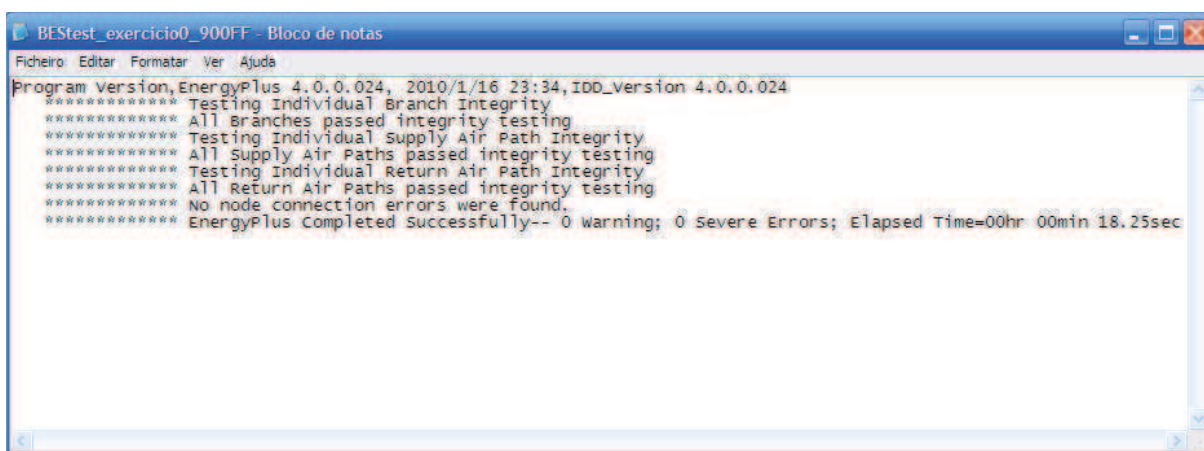


Fig.32 – Janela de relatório de avisos e erros.

Como é possível observar na Fig.32, confirma-se que não surgiram avisos ou erros.

Este relatório de erros permite identificar os erros encontrados durante a simulação. Este relatório identifica, além do erro, a localização desse erro, ou seja, identifica o campo onde está mal preenchido.

Assim sendo, chega-se à conclusão que os dados foram bem introduzidos.

É agora apresentado o modelo geométrico do caso 900FF obtido através do ficheiro *CAD* resultante da introdução das coordenadas dos diversos elementos no *EnergyPlus*:

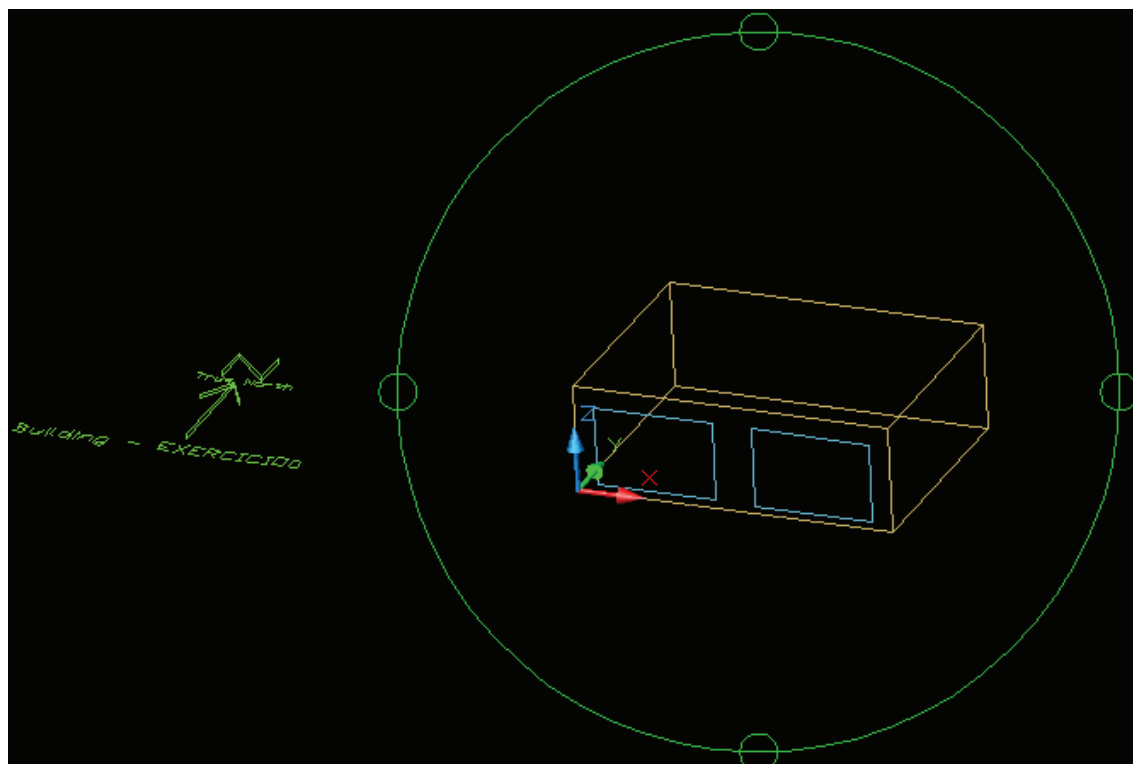


Fig.33 – Modelo geométrico em ficheiro CAD.

Observa-se pela Fig.33 que as coordenadas do modelo foram bem introduzidas e que o Norte está na orientação certa.

2.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Para o caso 900FF, apresenta-se no Quadro 5, os resultados da simulação. Foi considerando as duas possibilidades de introdução dos envidraçados.

A primeira coluna apresenta os resultados da simulação com os envidraçados introduzidos como elementos separados (ver características na Fig.15 e Fig.16).

A segunda coluna apresenta os resultados da simulação com os envidraçados introduzidos como um todo, ou seja, é considerada o valor do coeficiente de transmissão térmica – U e o factor solar do vidro (ver características na Fig.17).

Quadro 5 – Resultados da simulação.

	Caso 900FF	Caso 900FF com valor U_{env}
Temperatura média anual	27,2°C	27,2°C
Temperatura máxima	44,8°C	45,2°C
Temperatura mínima	-2,0°C	-2,5°C

Pode-se concluir que os resultados são semelhantes e que, ao considerar o valor do coeficiente de transmissão térmica do envidraçado – U, a diferença de temperatura é de aproximadamente 0,5°C para a temperatura máxima e mínima. Observa-se que a média anual se mantém igual.

Pode-se confirmar que esta solução alternativa é rápida e apresenta resultados muito próximos.

2.6. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Segue-se agora os resultados fornecidos pelo BEStest para o caso 900FF e os resultados obtidos pelo *EnergyPlus Development Team*, usando o EnergyPlus. Estes resultados são provenientes do documento *Energy Plus Testing With Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE 140-2007* [6]. É importante referir que os resultados obtido pelo *EnergyPlus Development Team* são com a introdução dos envidraçados por camadas.

Quadro 6 – Resultados BEStest.

BEStest - Caso 900FF	Intervalo de Resultados do BEStest	Resultados do <i>EnergyPlus Development Team</i>	Resultados Obtidos
Temperatura média anual	24,5°C a 27,5°C	26,4°C	27,2°C
Temperatura máxima	41,8°C a 46,4°C	43,7°C	44,8°C
Temperatura mínima	-6,4°C a -1,6°C	-2,4°C	-2,0°C

Observando o Quadro 6, repara-se que os valores obtidos aqui nesta dissertação estão próximos dos obtidos pelo *EnergyPlus Development Team* e que estes se encontram dentro do intervalo de resultados do BEStest.

Observa-se que, embora sendo usada a mesma versão de software do EnergyPlus, os resultados aqui obtidos no Quadro 5 diferem ligeiramente dos obtidos pelo *EnergyPlus Development Team* (ver Quadro 6). A diferença aqui referida é de 1,1°C para a temperatura máxima e de 0,4°C para a temperatura mínima. A média, por sua vez difere de 0,8°C.

Esta diferença pode ser justificada de várias maneiras.

Uma das dificuldades no preenchimento dos dados no *IDF Editor* é a definição da rugosidade do material. Esta informação, como dito anteriormente, não é dada pelo que é adoptada. Essa definição da rugosidade pode influenciar ligeiramente os resultados. É importante referir que no documento fornecido pelo *EnergyPlus Development Team* não é referido qual a rugosidade tido em conta para os elementos.

Outra justificação para os valores diferirem é devido à temperatura superficial do solo, pois este valor é sugerido pelo programa uma vez que este é desconhecido. No documento fornecido pelo *EnergyPlus Development Team* [6], não é referido qual o valor tido em conta para este grupo.

É importante referir que o *EnergyPlus Development Team* [6] não apresenta todos os valores nem os campos realmente preenchidos, pelo que poderá ter adoptado valores diferentes para a informação não fornecida pelo BEStest.

Tendo em conta todos os campos que são deixados por defeito e aqueles em que não se tem informação, deixando o programa sugerir esses valores, pode-se concluir que existe realmente alguns factores que levam a que os resultados se possam afastar.

Assim sendo, conclui-se que, na ausência de alguns dados, o utilizador encontra-se numa situação em que pode arbitrar esses valores em falta, o que acaba por originar uma ligeira diferença de resultados em comparação com outros utilizadores do mesmo software para o mesmo caso de estudo.

Para finalizar este capítulo, apresenta-se os gráficos de barras com os resultados obtidos pelos diversos programas de simulação. Os resultados são retirados igualmente do mesmo documento [6]:

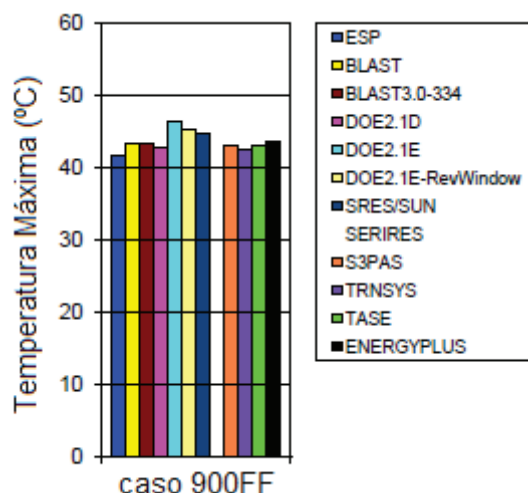


Fig.34 – Temperatura máxima proveniente dos diversos programas.

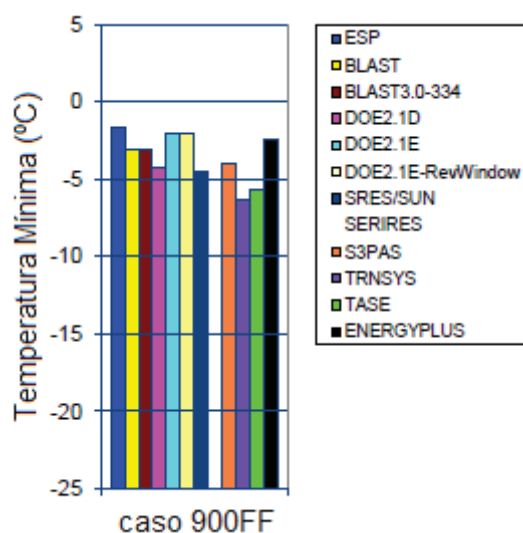


Fig.35 – Temperatura mínima proveniente dos diversos programas.

A partir destes gráficos tiram-se os intervalos de valores obtidos pelo método BEStest com os programas envolvidos. Estes intervalos podem ser observados na primeira coluna do Quadro 6.

Observa-se que o programa EnergyPlus está dentro da média dos valores obtidos em relação aos diversos programas de simulação.

Assim, conclui-se que o programa EnergyPlus é fiável e que os resultados obtidos pela autora desta dissertação estão dentro do esperado.

3

ESTUDO DE UM CASO REAL

3.1. DESCRIÇÃO DA OBRA EM ESTUDO

O caso real em estudo situa-se no Porto.

A moradia em estudo faz parte de um complexo constituído por doze moradias unifamiliares independentes, compostas por três pisos, um dos quais desenvolvido a um nível inferior ao do arruamento. As moradias desenvolvem-se em dois conjuntos de seis, paralelas entre si e separadas por um corredor de acesso e circulação comum, ao nível do piso 0.

A figura seguinte mostra o complexo e a moradia escolhida para estudo.

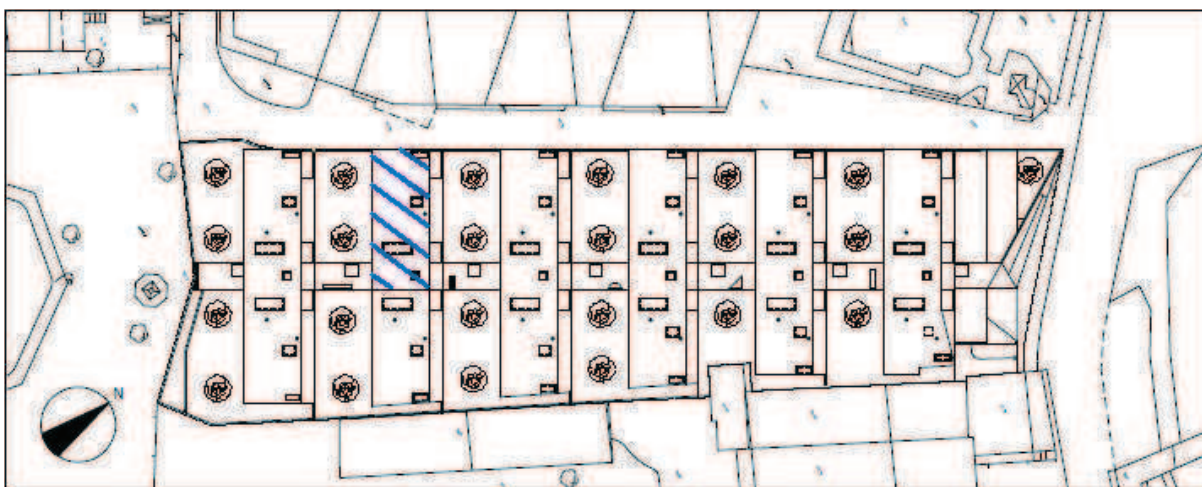


Fig.36 – Localização da moradia em estudo.

A moradia em estudo é uma habitação unifamiliar T5 situada a Noroeste na sua fachada principal, a fachada posterior a Sudeste e as fachadas laterais orientadas a Sudoeste e Nordeste. A fachada com envidraçado encontra-se orientada a Sudoeste.

São apresentados a seguir algumas figuras identificativas da habitação em estudo.

A Fig.37 mostra a fachada orientada a Sudoeste:



Fig.37 – Fachada com envidraçados orientada a Sudoeste - Foto.

Para visualização geral desta fachada, apresenta-se o esquema a seguir:

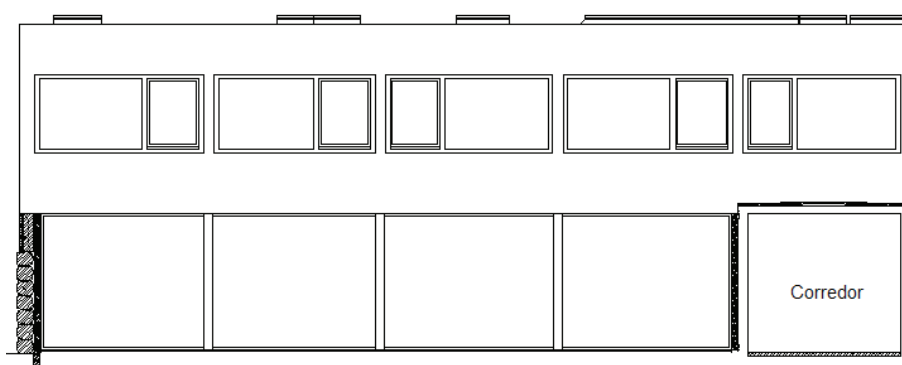


Fig.38 – Fachada com envidraçados orientada a Sudoeste - Esquema.

No piso inferior, observa-se 4 envidraçados sendo os 3 primeiros (da esquerda para a direita) os envidraçados da sala de estar. O 4º envidraçado é da cozinha.

Ao lado da cozinha existe um corredor de acesso comum às várias moradias.

No piso superior observam-se 5 envidraçados sendo todos eles para quartos. O 5º envidraçado do piso superior (da esquerda para a direita) encontra-se por cima do corredor, estando então este espaço aquecido em contacto com um espaço não aquecido.

Ainda há um piso inferior, a cave, sendo esta totalmente enterrada e situada por baixo da sala.

Tendo uma visão geral da fachada Sudoeste é agora apresentada a fachada Nordeste da habitação.

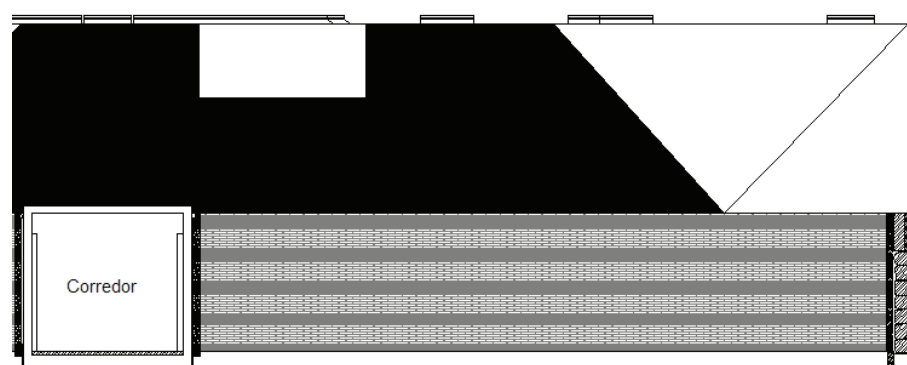


Fig.39 – Fachada Nordeste - Esquema.

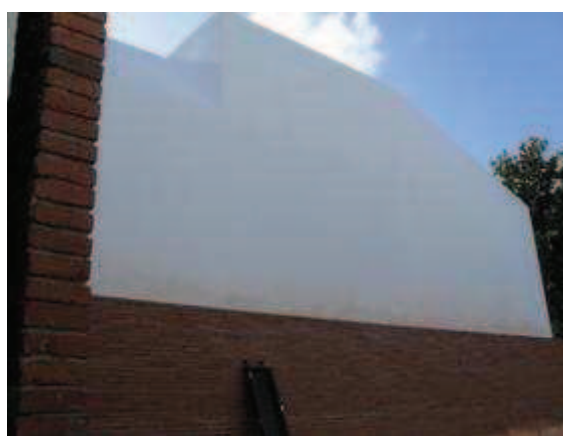


Fig.40 – Fachada Nordeste - Foto.

Para a fachada Noroeste, temos a Fig.41:



Fig.41 – Fachada Noroeste.

A Fig.42 mostra a entrada para a habitação unifamiliar em estudo, situada do corredor de acesso comum. Esta entrada situa-se a Sudeste:



Fig.42 – Fachada Sudeste – Entrada para a habitação.

Para entender melhor a geometria da casa são apresentadas as plantas da habitação.

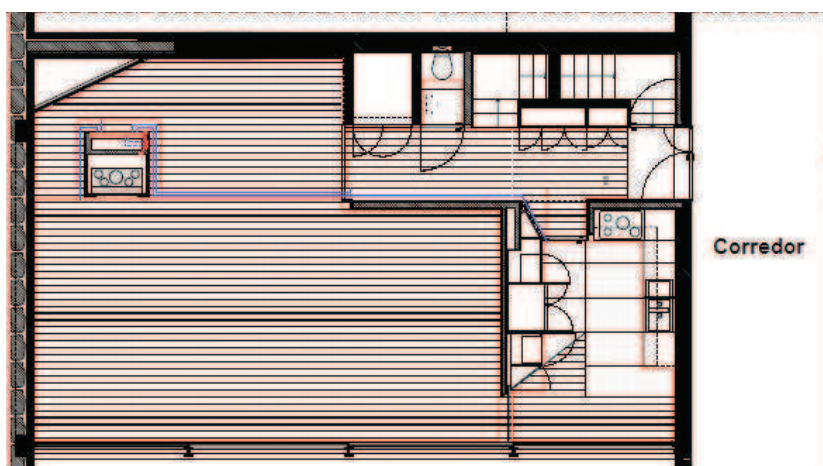


Fig.43 – Planta do piso 0 (Rés-do-chão).

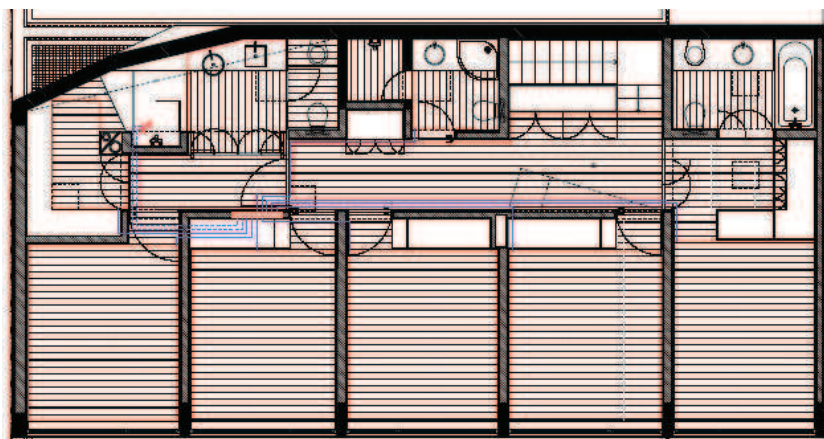


Fig.44 – Planta do piso 1.

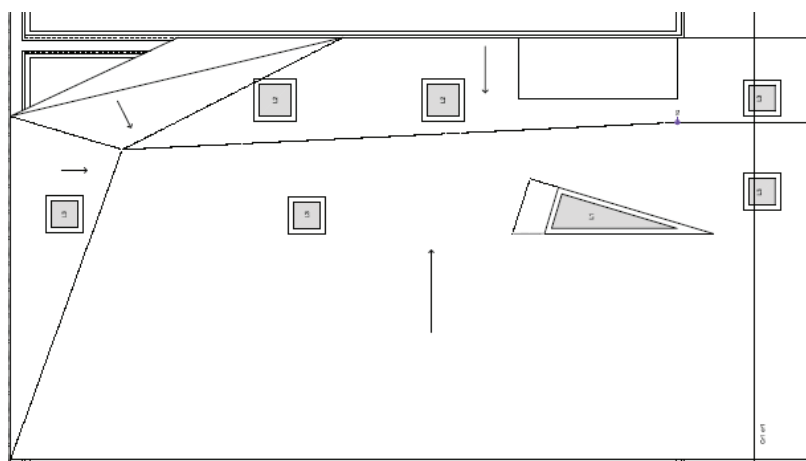


Fig.45 – Planta da cobertura.

3.2. DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Nesta secção é apenas tratada a descrição dos elementos construtivos efectivamente colocados, uma vez que a habitação em estudo encontrava-se em fase de acabamentos aquando da escrita desta dissertação. Assim sendo, é feita apenas a simulação com as características dos materiais efectivamente colocados.

Para a descrição dos materiais opacos é especificado a espessura (e), a condutibilidade térmica (λ), a densidade (ρ), o calor específico (C_p) e a resistência térmica (R).

Para os envidraçados é especificado o valor de coeficiente de transmissão térmica (U), o factor solar e a transmissão luminosa. Os valores correspondentes as características dos envidraçados e das clarabóias foram retirados de fichas técnicas [8] e [9].

Os valores da condutibilidade térmica (λ), da densidade (ρ) e da resistência térmica (R) são tirados do ITE 50 [10].

Os valores para o calor específico (C_p) são resultantes de pesquisa no livro ASHRAE – *Handbook of Fundamentals* [11] e de pesquisa na internet [12].

No caso dos tijolos e dos blocos cerâmicos (elemento resistente), o ITE 50 só fornece a resistência térmica destes materiais, assim o valor da condutibilidade térmica é obtida através da espessura e da resistência térmica. Apresenta-se a seguir a fórmula que permite determinar o parâmetro em falta:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (3)$$

Para o calor específico [13] e a densidade [14] dos tijolos e blocos cerâmicos, os valores foram retirados em site da internet.

3.2.1. PAREDES EXTERIORES PISO 0

As paredes exteriores para o piso 0 são de 3 tipos:

Fachada Sudeste Piso 0 – Tipo 1

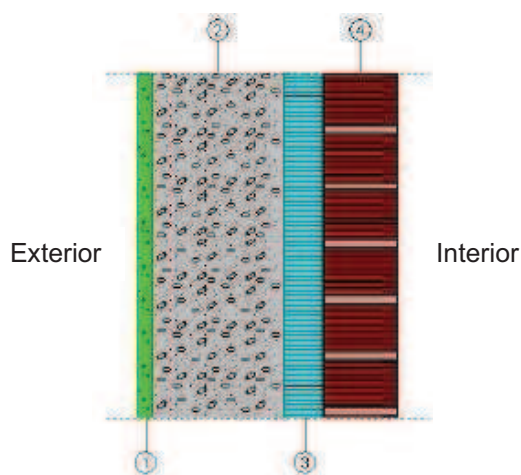


Fig.46 – Parede exterior Tipo 1.

A parede do tipo 1 é aplicada na fachada Sudeste do piso 0 e é constituída pelas seguintes camadas:

Quadro 7 – Parede Tipo 1.

Camada	Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]	R [m ² .K/W]
1	Reboco	0,02	1,3	1900	900	
2	Betão	0,2	2	2450	750	
3	Vidro Celular	0,04	0,037	33	1210	
4	Tijolo Cerâmico Maciço	0,11	0,846	1800	900	0,13

Fachada Noroeste Piso 0 – Tipo 2

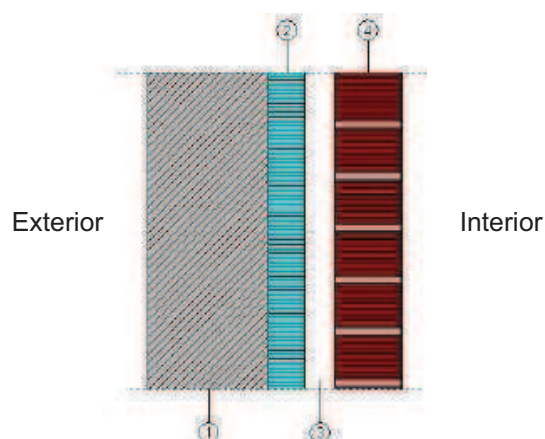


Fig.47 – Parede exterior Tipo 2.

A parede do tipo 2 é aplicada na fachada Noroeste do piso 0 e é constituída pelas seguintes camadas:

Quadro 8 – Parede Tipo 2.

Camada	Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]	R [m ² .K/W]
1	Granito	0,2	2,8	2600	790	
2	Vidro Celular	0,04	0,037	33	1210	
3	Caixa de Ar	0,05				0,18
4	Tijolo Cerâmico Maciço	0,11	0,846	1800	900	0,13

Fachada Nordeste Piso 0 – Tipo 3

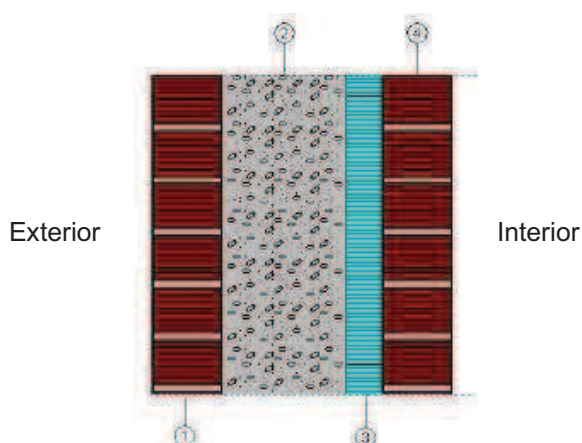


Fig.48 – Parede exterior Tipo 3.

A parede do tipo 3 é aplicada na fachada Nordeste do piso 0 e é constituída pelas seguintes camadas:

Quadro 9 – Parede Tipo 3.

Camada	Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]	R [m ² .K/W]
1	Tijolo Cerâmico Maciço	0,11	0,846	1800	900	0,13
2	Betão	0,2	2	2450	750	
3	Vidro Celular	0,04	0,037	33	1210	
4	Tijolo Cerâmico Maciço	0,11	0,846	1800	900	0,13

3.2.2. PAREDES EXTERIORES PISO 1

Todas as paredes exteriores no piso 1, fachada Sudoeste, Nordeste e Noroeste são do tipo 4.

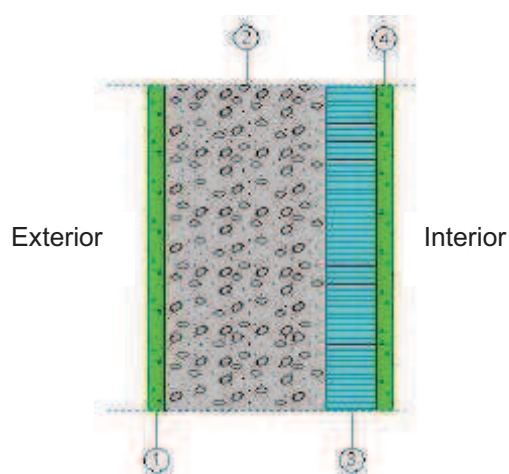


Fig.49 – Parede exterior Tipo 4.

A parede do tipo 4 é constituída pelas seguintes camadas:

Quadro 10 – Parede Tipo 4.

Camada	Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]	R [m ² .K/W]
1	Reboco	0,02	1,3	1900	900	
2	Betão	0,2	2	2450	750	
3	Vidro Celular	0,04	0,037	33	1210	
4	Reboco	0,02	1,3	1900	900	

Como a habitação apresenta uma geometria peculiar, há ainda paredes por definir.

Para perceber melhor quais são as paredes com essa tal geometria, segue as Fig.50 e Fig.51:



Fig.50 – Parede exterior inclinada triangular Tipo 5.

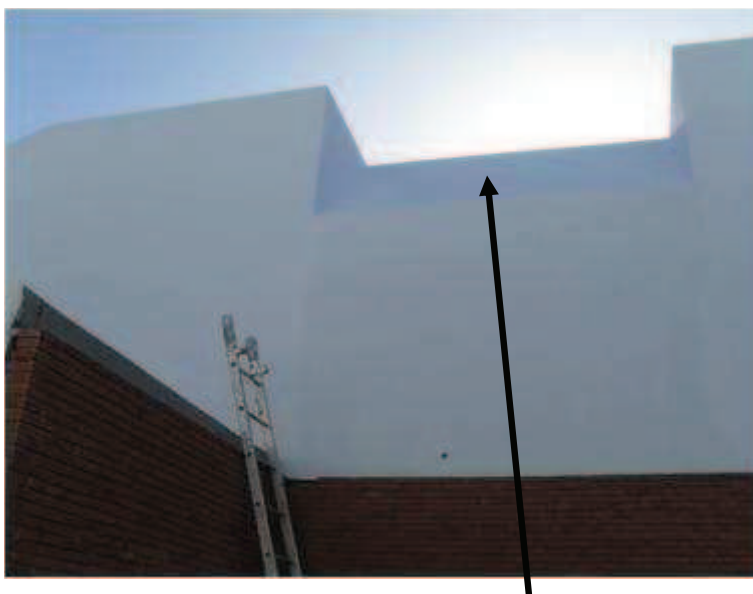


Fig.51 – Parede exterior inclinada rectangular Tipo 5.

Estas duas paredes, a rectangular e a triangular, são definidas como tipo 5. São, em termos de constituição, iguais a do tipo 4 mas a única variação é a espessura do vidro celular:

Quadro 11 – Parede Tipo 5.

Camada	Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]	R [m ² .K/W]
1	Reboco	0,02	1,3	1900	900	
2	Betão	0,2	2	2450	750	
3	Vidro Celular	0,05	0,037	33	1210	
4	Reboco	0,02	1,3	1900	900	

3.2.3. PAREDE DE SEPARAÇÃO DA HABITAÇÃO ADJACENTE

A habitação unifamiliar em estudo é uma moradia geminada. Assim sendo, há que definir o elemento de separação entre as duas moradias.

A parede de separação das habitações situa-se a Sudeste no piso 1 (quarto) e apresenta as seguintes características:

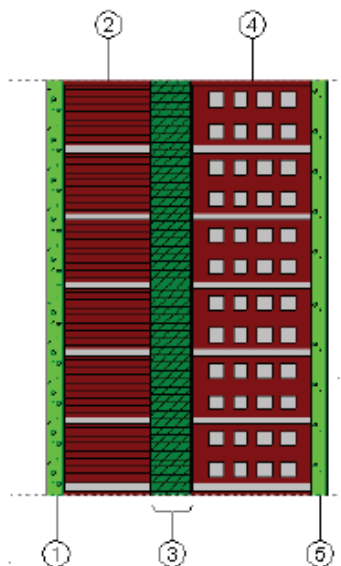


Fig.52 – Parede de separação da habitação adjacente

Quadro 12 – Parede de separação.

Camada	Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]	R [m ² .K/W]
1	Reboco	0,02	1,3	1900	900	
2	Tijolo Cerâmico Maciço	0,11	0,846	1800	900	0,13
3	Lã de Rocha	0,05	0,04	68	840	
4	Tijolo Cerâmico Furado	0,15	0,385	1200	900	0,39
5	Reboco	0,02	1,3	1900	900	

3.2.4. PAREDES INTERIORES

As paredes interiores são definidas da seguinte maneira:

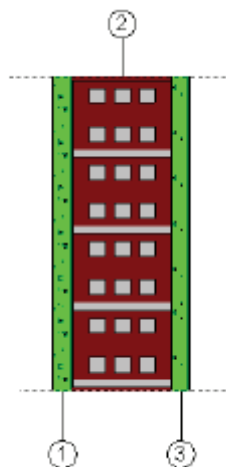


Fig.53 – Parede interior.

Quadro 13 – Parede interior.

Camada	Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]	R [m ² .K/W]
1	Reboco	0,02	1,3	1900	900	
2	Tijolo Cerâmico Furado	0,11	0,407	1200	900	0,27
3	Reboco	0,02	1,3	1900	900	

3.2.5. PAVIMENTOS

A habitação em estudo apresenta as seguintes características construtivas para o piso 0 e o piso 1:



Fig.54 – Pavimento piso 0 e 1.

Quadro 14 – Pavimento.

Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]	R [m ² .K/W]
Soalho		0,23	810	1200	
Camada de Regularização	0,05	0,46	1050	960	
Bloco de Aligeiramento	0,23	0,885	1200	900	0,26
Lã de Rocha	0,03	0,040	68	840	
Caixa de Ar	0,02				0,19
Gesso	0,013	0,57	1150	840	

3.2.6. COBERTURA

A cobertura da habitação apresenta as seguintes camadas:

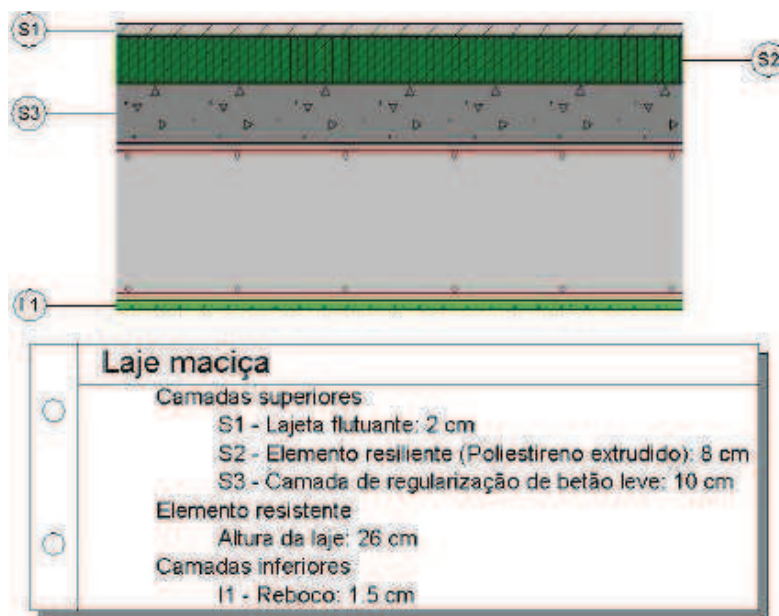


Fig.55 – Cobertura.

Quadro 15 – Cobertura.

Material	e [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]	R [m ² .K/W]
Poliestireno Extrudido	0,08	0,037	33	1210	
Camada de Regularização de Betão Leve	0,10	0,46	1050	960	
Betão	0,26	2,0	2450	750	
Reboco	0,015	1,3	1900	900	

3.2.7. ENVIDRAÇADOS

Os envidraçados utilizados na habitação unifamiliar são vidros duplos do tipo [8]:

Quadro 16 – Características dos envidraçados.

Vidro Duplo
4 (12 ar) 6 mm
$U=2,8 \text{ [W/m}^2\cdot\text{K]}$
Factor Solar = 0,75
Transmissão Luminosa = 0,8

Mostra-se a seguir algumas figuras dos envidraçados presentes na moradia.



Fig.56 – Envidraçado situado à Nordeste da sala de estar, piso 0.

O envidraçado da Fig.56 encontra-se sinalizado em azul claro na Fig.57:

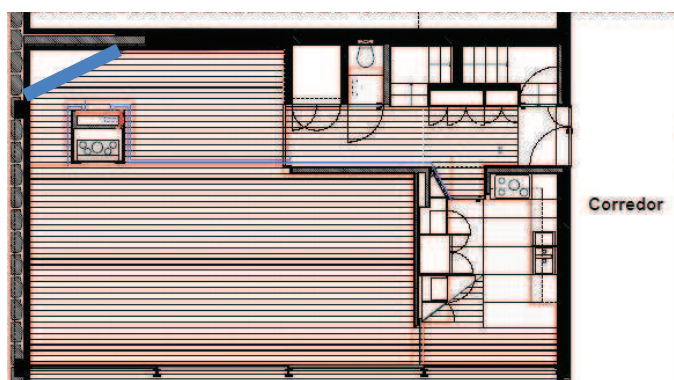


Fig.57 – Localização do envidraçado Nordeste do piso 0.



Fig.58 – Envidraçados da sala e dos quartos orientados à Sudoeste.

É de referir que, aquando da elaboração desta dissertação, os envidraçados não apresentavam qualquer tipo de dispositivo de sombreamento, pelo que os envidraçados foram simulados sem esses mesmos dispositivos.

3.2.8. CLARABÓIAS

A habitação em estudo apresenta na sua cobertura diversas clarabóias de geometria rectangular e triangular.

Mostra-se a seguir uma figura com uma clarabóia rectangular. Ver Fig.45 – Planta da cobertura, para observar a localização das clarabóias em planta:



Fig.59 – Clarabóia rectangular.

Estas clarabóias apresentam um vidro incolor com capa de controlo solar e possui as seguintes características [9]:

Quadro 17 – Características da clarabóia.

Vidro Simples Incolor
6 mm
$U=5,7 [W/m^2.K]$
Factor Solar = 0,50
Transmissão Luminosa = 0,32

3.3. INTRODUÇÃO DOS DADOS NO ENERGYPLUS

Neste subcapítulo descreve-se todos os dados de entrada necessários para executar a simulação da habitação unifamiliar em estudo.

Uma vez que o estudo da habitação segue o mesmo modelo que o caso 900FF, tratado no Capítulo 2 desta dissertação são apenas apresentados os campos relevantes à introdução dos dados. Os restantes grupos não referidos neste subcapítulo seguem o mesmo raciocínio de preenchimento visto no Capítulo 2. São justificadas aqui igualmente todas as opções tomadas.

Seguindo a ordem apresentada dos grupos do Capítulo 2, começa-se por referir o primeiro grupo a sofrer alterações.

3.3.1. LOCALIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

O grupo **Building** é o primeiro a sofrer alterações.

Field	Units	Obj1
Name		Serralves
North Axis	deg	30
Terrain		City
Loads Convergence Tolerance Value		0,04
Temperature Convergence Tolerance Value	deltaC	0,4
Solar Distribution		FullInteriorAndExterior
Maximum Number of Warmup Days		25

Fig.60 – Definição da localização da habitação.

Aqui existem duas diferenças em relação ao caso 900FF que são:

- *North Axis*;
- *Terrain*.

Em relação ao *North Axis*, é necessário saber qual o ângulo, em planta, entre a fachada Norte da habitação com o Norte verdadeiro (ou Norte Geométrico). Pela Fig.36, observa-se a direcção do Norte verdadeiro. Este ângulo é aproximadamente de 30°, pelo que é preenchido este campo com esse valor.

Quanto ao *Terrain*, é escolhida a opção Cidade (*City*) uma vez que a habitação encontra-se na cidade do Porto.

Os restantes campos são deixados por defeito, como no caso 900FF.

3.3.2. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Para o estudo da habitação unifamiliar são simulados as condições térmicas da moradia em questão aquando do desenvolvimento deste trabalho. Para validar os resultados obtidos pela simulação foram feitas medições “In Situ” através de sensores.

Uma condicionante ao definir o período de simulação é o ficheiro climático da zona pretendida. Como aqui não é pretendido uma simulação anual mas sim uma simulação para um determinado período, é na mesma requerida a utilização de um ficheiro climático.

Para validação dos resultados da simulação, é indispensável ter um ficheiro climático com dados reais medidos no período pretendido afim de se proceder a comparação dos dados obtidos pelos sensores.

O ficheiro climático com dados realmente medidos será aprofundado no Capítulo 4.

A seguir define-se o período da simulação no grupo **Run Period**:

Field	Units	Obj1
Name		
Begin Month		9
Begin Day of Month		28
End Month		12
End Day of Month		10
Day of Week for Start Day		UseWeatherFile
Use Weather File Holidays and Special Days		No
Use Weather File Daylight Saving Period		No
Apply Weekend Holiday Rule		No
Use Weather File Rain Indicators		Yes
Use Weather File Snow Indicators		Yes
Number of Times Runperiod to be Repeated		

Fig.61 – Definição do período de simulação.

O período de simulação a considerar é a partir do dia 28 de Setembro de 2009 até ao dia 10 de Dezembro de 2009 inclusive. Este intervalo corresponde efectivamente ao período de medição dos sensores colocados na habitação.

As restantes opções seguem o mesmo raciocínio que no caso 900FF.

3.3.3. CARACTERÍSTICAS DO SOLO

A habitação em estudo apresenta uma cave totalmente enterrada, sendo este espaço o único em contacto com o solo. Como, para além da cave, mais nenhum elemento da habitação está em contacto com o solo, aqui não é necessário definir o grupo **Site:GroundTemperature:BuildingSurface**. Pois este grupo serve unicamente para os elementos que estejam em contacto directo com o solo e que fazem parte de uma zona térmica. Sendo assim, este grupo não é preenchido.

Embora para a simulação não é considerada a cave como uma zona térmica, é definido mais a frente as condições fronteiras das diversas zonas térmicas da habitação com a cave.

3.3.4. DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS OPACOS

A metodologia para definição dos materiais opacos é a mesma.

Os materiais são definidos no grupo **Material**.

É adoptado a rugosidade *Rough* para todos os materiais opacos. Esta opção é assim adoptada devido à dificuldade em realmente definir a rugosidade do material.

Os valores da espessura (e), da condutibilidade térmica (λ), da densidade (ρ), do calor específico (C_p) e da resistência térmica (R) são tirados do subcapítulo 3.2.

Neste grupo (**Material**) são definidos todos os materiais opacos descritos no subcapítulo 3.2.

Optou-se por colocar igualmente neste grupo os isolantes térmicos, embora estes materiais possam ser introduzidos no grupo **Material:NoMass**. Os isolantes contribuem pouco para a inércia térmica mas como os valores da densidade e do calor específico são conhecidos, optou-se por preencher estes materiais no grupo **Material**. Assim sendo, o grupo **Material:NoMass** não é preenchido para o caso da obra em estudo.

Os restantes campos deste grupo são deixados por defeito.

Surge no entanto uma novidade neste caso em estudo. Existe, na construção dos elementos opacos do pavimento e da parede do tipo 2, caixas-de-ar. Esta situação era inexistente no caso 900FF, sendo então aqui explicado como é feita a introdução destas caixas-de-ar.

Para a introdução de caixas-de-ar existentes nos elementos opacos, é necessário ir ao grupo **Material:AirGap**:

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		CxAr	CxAr2
Thermal Resistance	m ² -K/W	0,18	0,19

Fig.62 – Definição das caixas-de-ar.

Neste grupo é necessário unicamente o valor da resistência térmica das caixas-de-ar [10].

As construções dos elementos opacos são definidos no grupo **Construction** e seguem o mesmo raciocínio que no caso 900FF.

3.3.5. DEFINIÇÃO DOS ENVIDRAÇADOS

Para a introdução dos envidraçados e clarabóias, é usado o grupo **WindowMaterial:SimpleGlazingSystem**. É utilizado este grupo uma vez que o coeficiente de transmissão térmica, a transmissão luminosa e o factor solar são conhecidos para os envidraçados e clarabóias. Como referido no subcapítulo 2.3.10., este grupo permite introduzir os envidraçados como um todo sendo este grupo o mais indicado.

Os valores são igualmente tirados de subcapítulo 3.2.

Tal como nos elementos opacos, os envidraçados e clarabóias são construídas no grupo **Construction** e segue novamente o mesmo raciocínio de preenchimento que no caso 900FF.

3.3.6. DEFINIÇÃO DAS ZONAS TÉRMICAS

A habitação em estudo é dividida em várias zonas térmicas. É necessário criar uma zona térmica sempre que haja uma diferença de materiais ou de condições fronteiras. Cada zona térmica deve ter uma geometria convexa. Assim, foram definidas 3 zonas térmicas distintas.

A primeira zona térmica definida é o piso 0. A segunda zona térmica é definida pelo piso 1. Esta separação de zonas térmicas é justificada por ambos os pisos apresentarem uma constituição de paredes diferentes.

Por fim, a terceira zona térmica definida é o quarto que se encontra no piso 1, por cima do corredor. Esta terceira zona térmica é criada por esta estar em contacto com um espaço não aquecido.

As figuras seguintes mostram como foi feita a divisão das zonas térmicas.

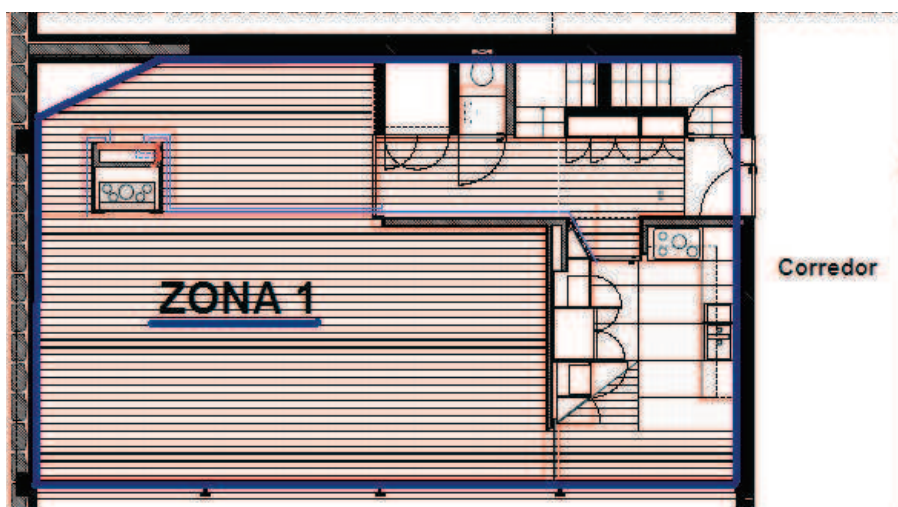


Fig.63 – Zona 1.

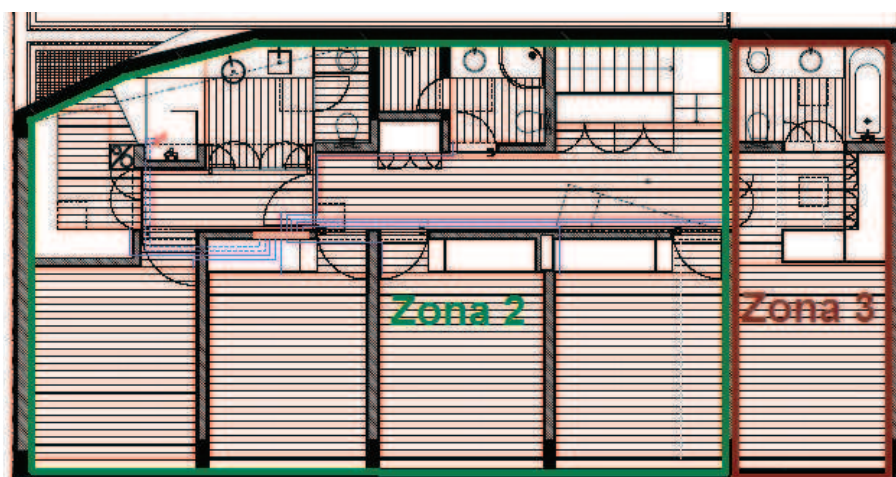


Fig.64 – Zona 2 e Zona 3.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Quarto5	Piso0	Piso1
Direction of Relative North	deg	0	0	0
X Origin	m	0	0	0
Y Origin	m	0	0	0
Z Origin	m	0	0	0
Type		1	1	1
Multiplier		1	1	1
Ceiling Height	m	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Volume	m3	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Zone Inside Convection Algorithm				
Zone Outside Convection Algorithm				
Part of Total Floor Area		Yes	Yes	Yes

Fig.65 – Definição das zonas.

Aqui no grupo **Zone** são denominadas as diversas zonas térmicas. Por opção, optou-se por identificar a zona 1 por Piso 0, a zona 2 por Piso 1 e a zona 3 por Quarto 5.

É necessário introduzir as coordenadas da origem de cada zona. Por simplicidade na introdução das coordenadas, adoptou-se uma origem (0;0;0) comum a todas as zonas, ou seja, a origem do edifício (ver Fig.23).

Em relação ao ângulo do Norte relativo, ou seja, o ângulo medido em planta entre a moradia e cada zona térmica é nula.

Os restantes campos são deixados por defeito.

3.3.7. CONDIÇÕES FRONTEIRAS DOS ELEMENTOS OPACOS

O grupo **BuildingSurface:Detailed** é um dos mais importantes a definir. Pois aqui é preciso ter em atenção quais as condições fronteiras a definir para cada elemento.

Como a habitação apresenta numerosos elementos construtivos aqui definidos, é apenas apresentado na Fig.66 alguns elementos.

É igualmente explicado a seguir, o preenchimento destes campos, em geral, e é referido os cuidados a ter.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		ParedeQuartoInterior	TectoPiso0	PavCoberturaQuarto	ParedeQuartoInterior
Surface Type		Wall	Ceiling	Roof	Wall
Construction Name		ParedelInterior	PavPiso1	PavCobertura	ParedelInterior
Zone Name		Piso1	Piso0	Quarto5	Quarto5
Outside Boundary Condition		Zone	Zone	Outdoors	Zone
Outside Boundary Condition Object		Quarto5	Piso1		Piso1
Sun Exposure		NoSun	NoSun	SunExposed	NoSun
Wind Exposure		NoWind	NoWind	WindExposed	NoWind
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Number of Vertices		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Vertex 1 X-coordinate	m	13	0	13	13
Vertex 1 Y-coordinate	m	0	6,5	8,1	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	5,82	2,45	5,82	5,82
Vertex 2 X-coordinate	m	13	0	13	13
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	0	0	0
Vertex 2 Z-coordinate	m	2,45	2,45	5,82	2,45
Vertex 3 X-coordinate	m	13	13	15,9	13
Vertex 3 Y-coordinate	m	8,1	0	0	8,1
Vertex 3 Z-coordinate	m	2,45	2,45	5,82	2,45
Vertex 4 X-coordinate	m	13	13	15,9	13

Fig.66 – Definição das condições fronteiras dos elementos.

Tendo neste caso 3 zonas térmicas distintas, é necessário especificar o seguinte:

- *Name*: nome para designar o elemento construtivo em análise;
- *Surface Type*: o tipo de superfície, mais concretamente o tipo de elemento em causa, ou seja, se é tecto (*Ceiling*), cobertura (*Roof*), parede (*Wall*) ou pavimento (*Floor*);
- *Construction Name*: nome da construção das camadas do elemento construtivo criado no grupo *Construction*;
- *Zone Name*: identificação da zona térmica onde o elemento construtivo se encontra;
- *Outside Boundary Condition*: condição fronteira exterior do elemento construtivo em análise, ou seja, especificar se o elemento faz fronteira com:
 - *Outdoors*: exterior;
 - *Adiabatic*: um elemento adiabático, ou seja, se faz fronteira com outro espaço aquecido mas de zona térmica diferente;
 - *Ground*: solo;
 - *Zone*: zona. Aqui é utilizada esta opção para elementos comuns de duas zonas, ou seja, toma-se por exemplo uma laje de um piso intermédio. Esta laje é considerada como tecto no piso inferior mas é igualmente considerada pavimento no piso superior;
 - *Surface*: Superfície que separa 2 zonas térmicas em que haja uma diferença de temperatura, tal como uma laje que separa uma garagem e uma sala de estar por exemplo.
- *Outside Boundary Condition Object*: permite dizer qual é a zona ou a superfície que faz fronteira com o campo *Outside Boundary Condition*. Este campo só é necessário ser preenchido quando é inserido a opção *Surface* ou *Zone* no campo *Outside Boundary Condition*.
- *Sun Exposure*: especificar se o elemento construtivo tem exposição solar;
- *Wind Exposure*: especificar se o elemento construtivo tem exposição ao vento.

Os campos *View Factor to Ground* e *Number of Vertices* são deixados por defeito.

Os campos seguintes referem-se à introdução das coordenadas de cada elemento construtivo definido anteriormente no grupo **Construction**. É de lembrar que cada elemento possui as suas coordenadas com a origem definida para a habitação, ou seja (0;0;0).

É importante mostrar uns exemplos sobre como é definido os elementos que estejam em contacto com uma zona ou uma superfície.

Toma-se como primeiro exemplo o segundo objecto apresentado na Fig.66. Este objecto é denominado como *TectoPiso0*. O elemento construtivo associado é a laje, aqui denominada *PavPiso1*. Esta laje separa duas zonas térmicas, a zona 1 (piso 0) e a zona 2 (piso 1). Esta laje é definida com tecto (*Ceiling*) para o piso 0 (ver objecto 2 na Fig.66) e como pavimento (*Floor*) para o piso 1 (ver objecto 23 na Fig.67). Mas como esta laje separa duas zonas térmicas, é necessário especificar em *Outside Boundary Condition* e em *Outside Boundary Condition Object* que o tecto está em contacto com uma zona térmica e que esta zona é o piso 1. Para o objecto 23 (ver Fig.67), o raciocínio é o mesmo.

É então necessário definir duas vezes o mesmo elemento com as mesmas coordenadas, afim de o programa perceber que o elemento é o mesmo mas separa duas zonas térmicas distintas.

O mesmo acontece com a parede que separa o Quarto 5 (zona 3) do piso 1 (zona 2) (ver objectos 1 e 4 da Fig.66).

Na Fig.67 mostra-se outro exemplo de preenchimento no caso de haver um espaço com uma diferença de temperatura:

Obj22	Obj23
PavPiso0	PavPiso1
Floor	Floor
PavPiso0	PavPiso1
Piso0	Piso1
Surface	Zone
PavPiso0	Piso0
NoSun	NoSun
NoWind	NoWind
autocalculate	autocalculate
autocalculate	autocalculate
13	13
8,1	8,1
0	2,45
13	13
0	0
0	2,45
0	0
0	0
0	2,45
0	0

Fig.67 – Zone and Surface Condition.

No caso de haver um espaço com diferenças de temperaturas, a opção *Surface* é a opção a escolher. Como referido anteriormente, escolha-se esta opção no caso de uma zona estar em contacto com uma garagem ou uma cave, como sendo aqui o caso (ver objecto 22 da figura 67). Pois uma vez que a cave não constitui uma zona térmica (espaço não aquecido), esta zona simplesmente não foi definida. Mas

no entanto o programa tem de ter em conta que o piso 0 está em contacto com um espaço cuja temperatura difere da outra zona adjacente. Ao escolher a opção *Surface*, o programa está a ter em conta esta mesma situação.

Para o caso de existir um elemento de separação de dois espaços aquecidos como a parede que separa o quarto 5 da habitação unifamiliar adjacente, adopta-se a opção *Adiabatic*. Aqui não é necessário preencher o campo *Outside Boundary Condition Object*.

Para as restantes condições fronteiras, o raciocínio é o mesmo que visto no Capítulo 2 do caso 900FF.

3.3.8. DEFINIÇÃO DA VENTILAÇÃO

ZoneVentilation

Este grupo é ligeiramente diferente do grupo *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*, visto no Capítulo 2. Enquanto o *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*, como visto anteriormente, é para qualquer infiltração não intencional de ar, o *ZoneVentilation* é o grupo a escolher quando é pretendido um fluxo de ar para ventilação da zona térmica pretendida de forma não mecânica.

Na figura seguinte apresenta-se como é preenchido os campos neste grupo:

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Ventilação0	Ventilação1	VentilaçãoQuarto
Zone Name		Piso0	Piso1	Quarto5
Schedule Name		Constant	Constant	Constant
Design Flow Rate Calculation Method		AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour
Design Flow Rate	m3/s			
Flow Rate per Zone Floor Area	m3/s-m2			
Flow Rate per Person	m3/s-person			
Air Changes per Hour		0,8	0,8	0,8
Ventilation Type		Natural	Natural	Natural
Fan Pressure Rise	Pa	0	0	0
Fan Total Efficiency		1	1	1
Constant Term Coefficient		1	1	1
Temperature Term Coefficient				
Velocity Term Coefficient				
Velocity Squared Term Coefficient				
Minimum Indoor Temperature	C			
Minimum Indoor Temperature Schedule Name				
Maximum Indoor Temperature	C			
Maximum Indoor Temperature Schedule Name				
Delta Temperature	deltaC			
Delta Temperature Schedule Name				
Minimum Outdoor Temperature	C			
Minimum Outdoor Temperature Schedule Name				
Maximum Outdoor Temperature	C			
Maximum Outdoor Temperature Schedule Name				
Maximum Wind Speed	m/s			

Fig.68 – Grupo *ZoneVentilation*.

O preenchimento deste grupo é muito semelhante ao do grupo *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*.

Primeiro define-se o nome pretendido para a ventilação em cada zona térmica, neste caso adopta-se os seguintes nomes:

- Ventilação0 para o piso 0 (zona 1);
- Ventilação1 para o piso 1 (zona 2);
- VentilaçãoQuarto para o quarto 5 (zona 3).

No campo *Zone Name* é especificado a zona térmica onde se dá a ventilação.

No campo *Schedule Name* é especificada a *Schedule* criada. A *Schedule* é definida exactamente da mesma maneira que no Capítulo 2, só que aqui decidiu-se nomear a *Schedule* de *Constant* por opção própria.

No campo *Design Flow Rate Calculation Method* é referido como é pretendido o cálculo da ventilação, sendo possível definir este campo das seguintes maneiras;

- *Flow/Zone*;
- *Flow/Area*;
- *Flow/Person*;
- *AirChanges/Hour*.

Aqui, por simplicidade, é optado a opção *AirChanges/Hour*. Esta escolha deve-se a que, se optar pelo *Flow/Zone* como no Capítulo 2, seria necessário calcular o *Design Flow Rate* como explicado nesse mesmo capítulo. Ora aqui torna-se um cálculo mais complexo devido à geometria peculiar da habitação unifamiliar. Optando por esta opção, é necessário especificar unicamente a taxa de renovação horária, deixando o próprio programa calcular o *Design Flow Rate* segundo o volume da habitação. Esse volume é calculado consoante as coordenadas dos diversos elementos.

Tendo esta opção escolhida, passa-se directamente ao valor da taxa de renovação horária pretendida. O valor mínimo da taxa de renovação horária permitido pelo RCCTE [15] é de $0,6 \text{ h}^{-1}$. Na realidade, não sabendo qual o valor real em obra, é feita a simulação com vários valores de taxa de renovação horária. Como ponto de partida, optou-se por utilizar o valor de $0,8 \text{ h}^{-1}$ sendo este valor obviamente ajustável.

Uma novidade em relação ao grupo do *ZoneInfiltration:DesignFlowRate* é a possibilidade de especificar o tipo de ventilação, ou seja, se é do tipo:

- *Natural*;
- *Intake*;
- *Exhaust*.

A ventilação natural é feita, neste caso, através de pequenas aberturas situadas acima dos envidraçados dos quartos (ver Fig.69) e através de aberturas de saídas de ar nas instalações sanitárias. Como a obra estava em fase de acabamentos aquando do desenvolvimento deste trabalho, as aberturas não tinham qualquer tipo de grelha.

Uma vez que a ventilação é feita através de pequenas aberturas e sem qualquer dispositivo mecânico, escolhe-se então a opção *Natural*.



Fig.69 – Abertura para ventilação natural.

Uma vez que a ventilação é natural, os campos seguintes (*Fan Pressure Rise* e *Fan Total Efficiency*) são deixados por defeito. Estes campos só dizem respeito à pressão do ventilador e da sua eficiência. Como tal, a pressão é nula o que implica uma eficiência total.

Para os restantes campos deste grupo, estes são ignorados uma vez que não é usado nenhum aparelho mecânico (ventilador) para ventilação da habitação.

3.3.9. GANHOS INTERNOS

A moradia unifamiliar em estudo não apresentava qualquer tipo de ganhos internos a considerar no programa aquando do desenvolvimento deste trabalho, pois a moradia encontrava-se em fase de acabamento pelo que não foi tido em conta os ganhos associados a equipamentos, electricidade nem pessoas. Assim sendo, este grupo não é preenchido.

3.3.10. DEFINIÇÃO DOS *OUTPUTS*

Para terminar, é definido no grupo **Output:Variable** os dados de saída necessários para análise neste trabalho:

Field	Units	Obj1	Obj2
Key Value		*	*
Variable Name		Zone Air Relative Humidity	Zone/Sys Air Temperature
Reporting Frequency		Timestep	Timestep
Schedule Name			

Fig.70 – *Outputs*.

Neste caso, é pretendido 2 *Outputs* distintos:

- *Zone Air Relative Humidity*: humidade relativa do ar na zona térmica;
- *Zone/Sys Air Temperature*: temperatura do ar para a zona térmica.

3.3.11. NOTA FINAL

Tendo tudo definido no *IDF Editor*, é então necessário definir o ficheiro climático antes de se proceder à simulação.

Este ficheiro climático tem de ser estudado e analisado antes de se fazer uma simulação, pois aqui não é pretendido uma simulação anual, mas sim, uma simulação com dados meteorológicos reais para a zona do Porto para o período de 28 de Setembro de 2009 até 10 de Dezembro de 2009.

O ficheiro climático é abordado no subcapítulo 4.4.

4

MEDIÇÕES “IN SITU” E DADOS CLIMÁTICOS

4.1. MEDIÇÕES “IN SITU” ATRAVÉS DE SENSORES DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA

4.1.1. DESCRIÇÃO SUMÁRIA DOS APARELHOS DE MEDIÇÃO

Para se proceder à comparação dos resultados obtido através do programa de simulação do comportamento higratérmico, o EnergyPlus, foram utilizados sensores que medem a temperatura e a humidade relativa na habitação unifamiliar.

Estes sensores são dispositivos que permitem avaliar as características do ambiente numa zona térmica ou até no exterior da habitação.

Para o presente trabalho, foram utilizados sensores de modelo HOBO. A Fig.71 mostra um dos sensores colocado na habitação unifamiliar:



Fig.71 – Sensor HOBO.

4.1.2. CONFIGURAÇÃO DOS SENSORES

Para que os sensores iniciassem as suas medições, foi necessário configurá-los. Para tal, foi usado um software próprio, o BOXCAR [16]. O software permitiu configurar os sensores da seguinte maneira:

- Definição do intervalo de amostragem;
- Definição do tamanho da amostra;
- Definição do método de arranque;
- Sincronização dos relógios;

- Nome do ficheiro.

Neste trabalho foi definido o intervalo da amostragem de 15 em 15 minutos. Ao definir esse intervalo, o programa define automaticamente o tamanho da amostra.

4.1.3. COLOCAÇÃO DOS SENSORES

Os sensores foram numerados e colocados estrategicamente a meia altura da parede e distribuídos pela habitação unifamiliar como mostrado nas Fig.72 e Fig.73:

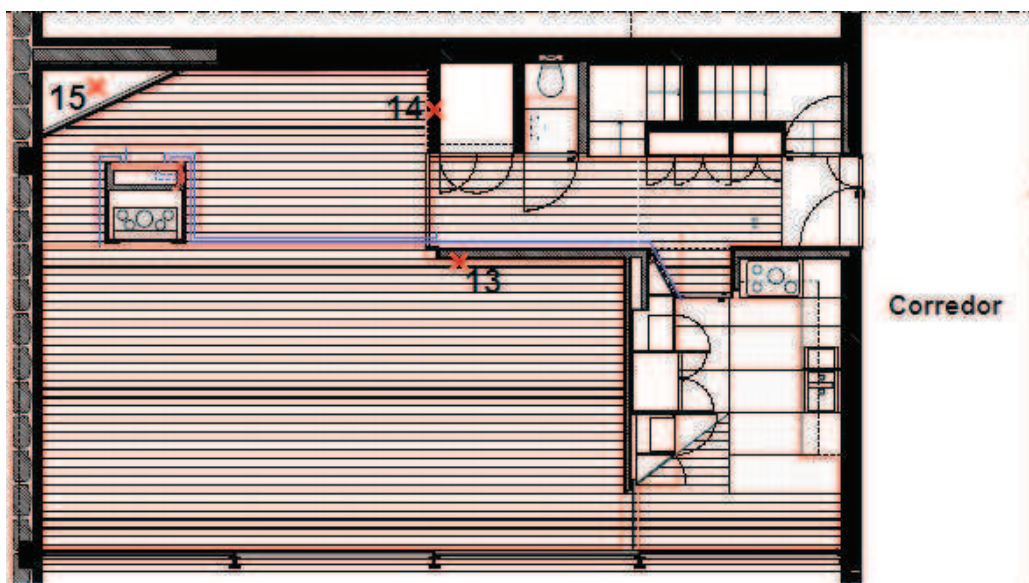


Fig.72 – Colocação dos sensores no piso 0.

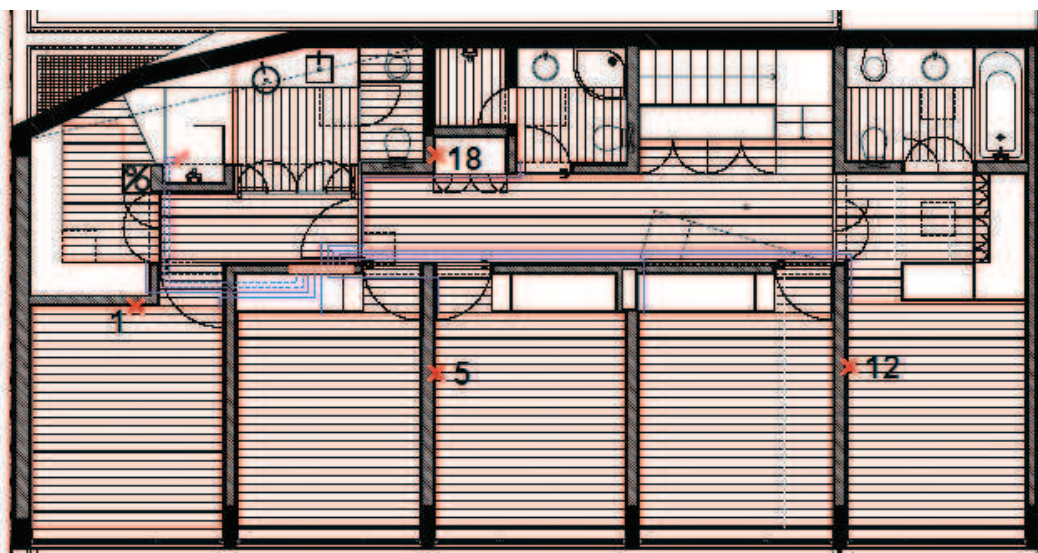


Fig.73 – Colocação dos sensores no piso 1.



Fig.74 – Colocação do sensor 14 no piso 0.

Uma regra importante para colocação dos sensores foi evitar exposição solar directa pelos envidraçados e pelas clarabóias e afixá-los nas paredes interiores.

Foi difícil a escolha da localização dos sensores 13 e 14 do piso 0 (zona 1). Uma vez que o piso 0 possui uma grande área de envidraçados, é necessário evitar que os sensores estejam em contacto directo com a luz solar.

Outra situação a evitar é a colocação do sensor contra uma parede que está em contacto com o exterior, pois a radiação solar e temperatura exterior influenciam as temperaturas interiores.

Outra dificuldade presente na escolha da colocação dos sensores foi o facto de a habitação não ter portas aquando do desenvolvimento deste trabalho, pelo que a entrada para a habitação era fechada temporariamente por um elemento de contraplacado. Uma vez que a habitação unifamiliar se encontrava em fase de acabamentos, a entrada encontrava-se na maior parte das vezes desprotegida, o que originava correntes de ar no hall de entrada. Como tal, a colocação dos sensores no hall de entrada não pareceu ser viável.

Tendo então em conta estas dificuldades, optou-se por colocar o sensor 14 fora do hall de entrada e afixado numa parede interior. O sensor 13 ficou na sala de estar, contra uma parede interior e fora do alcance das correntes de ar do hall de entrada (ver Fig.72).

Os sensores 13 e 14 mediram a temperatura interior.

Para a colocação do sensor 12 no quarto 5 (piso 1, zona 3), foi colocado o sensor contra a parede interior (sendo esta o elemento de separação das zonas 2 e 3), evitando a clarabóia e o envidraçado, tal como se pode observar na Fig.73.

O sensor 12 mediu a temperatura interior.

Para o piso 1 (zona 2) foram colocados três sensores distribuídos pelo piso 1. O sensor 5 foi instalado num quarto intermédio (quarto 3), contra uma parede interior. O sensor 18 foi instalado no corredor do piso, contra uma parede interior e fora do alcance da exposição solar pelas clarabóias presentes nesse

corredor. O sensor 1 foi instalado no quarto 1 e colocado igualmente contra uma parede interior e fora do alcance da exposição solar.

Os sensores 5 e 18 mediram a temperatura interior. O sensor 1 mediu a temperatura e humidade relativa no interior.

Existe somente um sensor (15) que se encontrava no exterior da habitação, como se pode observar na Fig.72 e Fig.75. Este sensor permitiu a obtenção da temperatura e humidade relativa exterior da habitação.

Devidas às condições no local e devido à falta de sistemas horizontais de sombreamento (palas) foi extremamente difícil colocar um sensor no exterior sem protegê-lo. Por isso, o único local exterior disponível em que se pôde proteger o sensor foi onde se encontrava o sensor 15. A Fig.75 mostra a localização do sensor 15:



Fig.75 – Colocação do sensor 15 no exterior.

Após colocação dos sensores nos locais das Fig.72 e Fig.73, verificou-se que estes estavam bem fixos no ponto determinado, a fim de evitar possíveis quedas, o que originaria possíveis estragos nos equipamentos ou falsear as medições.

O arranque dos sensores foi feito através do programa. Foi feita a programação do arranque dos sensores, indicando a data e hora de arranque de forma automática. Para simplicidade, programou-se todos os sensores colocados na habitação à mesma data e hora.

4.1.4. RECOLHA DE DADOS

No final do período de medição, procedeu-se à recolha da informação. Para tal, descarregou-se as medições dos sensores através do software BOXCAR. As recolhas de valores foram efectuadas em visitas à obra com um espaçamento de 1 ou 2 semanas.

As medições obtidas são apresentadas e analisadas no subcapítulo 4.2.

4.2. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Neste subcapítulo apresenta-se os resultados das medições através dos sensores HOBO para o período de 28 de Setembro de 2009 até 10 de Dezembro de 2009. Este período corresponde ao intervalo de tempo de medições efectuadas na obra.

Estas medições serão comparadas com os resultados da simulação do caso em estudo no Capítulo 5.

É importante referir mais uma vez que neste período, a obra encontrava-se em fases de acabamentos, pelo que a habitação unifamiliar ainda não se encontrava habitada.

A seguir apresenta-se os resultados das medições para o ambiente exterior e para as zonas térmicas definidas anteriormente, ou seja, Piso 0 (Zona 1), Piso 1 (Zona 2) e Quarto 5 (Zona 3).

4.2.1. RESULTADOS PARA O AMBIENTE EXTERIOR

Para o ambiente exterior obteve-se o seguinte gráfico de temperaturas:

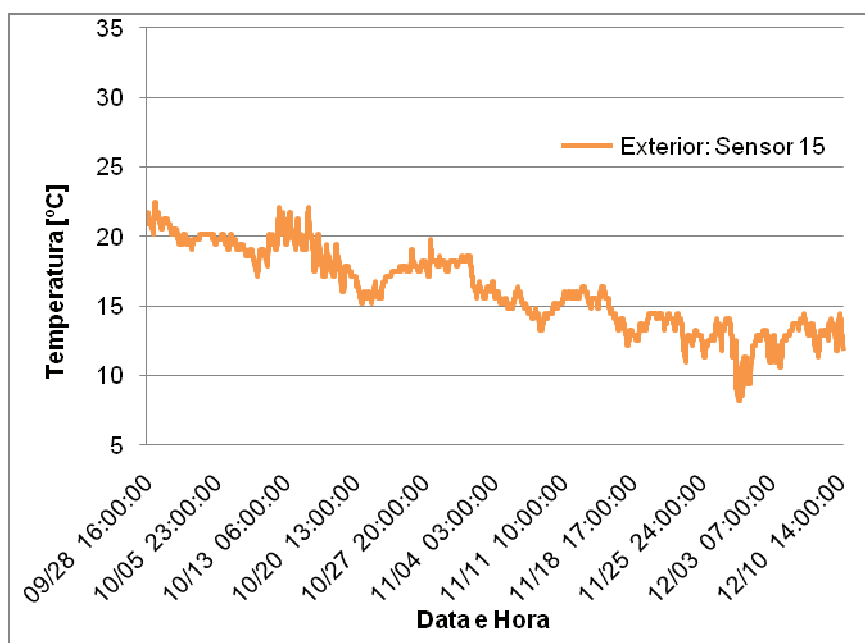


Fig.76 – Gráfico de temperatura para o ambiente exterior.

Observa-se pela Fig.76 que a temperatura do ar exterior vai diminuindo ao longo do tempo. Esta situação era de esperar uma vez que o período de medição foi de Setembro a Dezembro.

A seguir apresenta-se o gráfico da humidade relativa para o ambiente exterior:

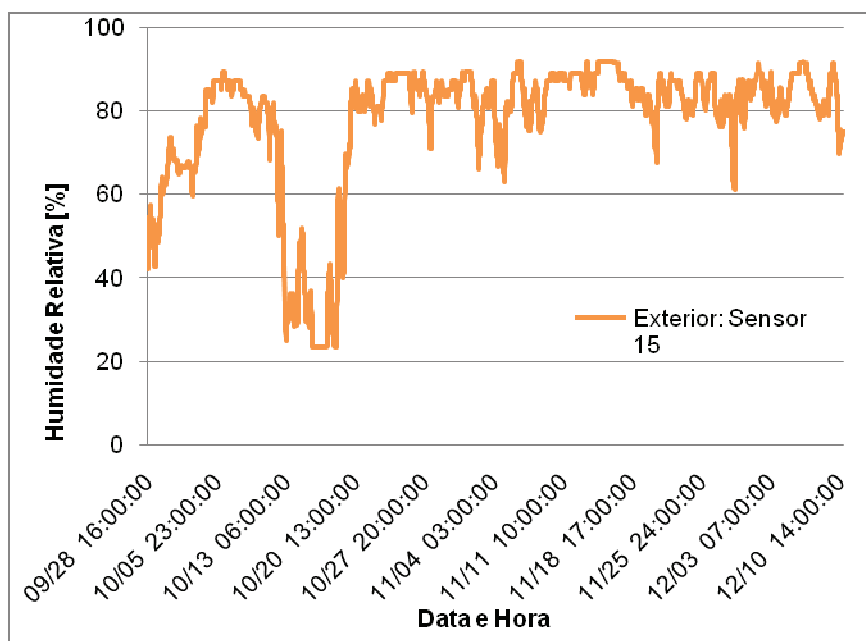


Fig.77 – Gráfico de humidade relativa para o ambiente exterior.

Observa-se que houve uma grande diminuição da humidade relativa a partir do dia 12 de Outubro e que a partir do dia 19 de Outubro a humidade relativa voltou a subir.

É de referir que no final de Outubro e início de Novembro foi a época de início de chuvas.

4.2.2. RESULTADOS PARA O PISO 0 (ZONA 1)

Para o Piso 0 obteve-se o seguinte gráfico:

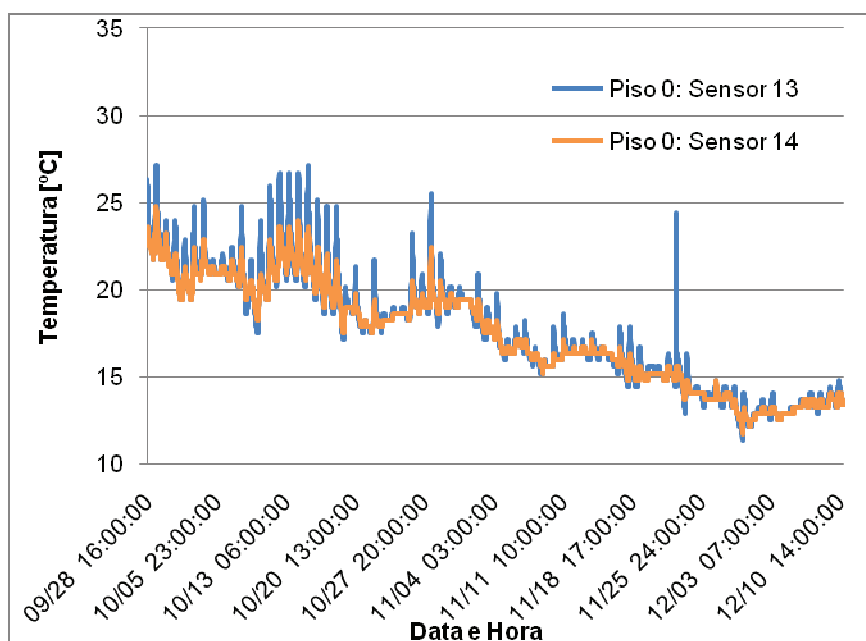


Fig.78 – Gráfico de temperatura para o piso 0.

Pela leitura do gráfico observa-se que ambos os sensores tiveram medições com uma evolução semelhante.

Observa-se, no entanto, que o sensor 13 apresenta uma amplitude maior que o sensor 14, ou seja, o sensor 13 apresenta picos mais elevados que o sensor 14. Isto deve-se pela localização do sensor 13, pois este encontrava-se mais próximo dos envidraçados da sala de estar enquanto o sensor 14 encontrava-se mais afastado destes. Assim, o sensor 13 encontrava-se num local mais quente, devido à radiação solar, que o sensor 14.

Observa-se igualmente que, à medida que o tempo vai passando, as temperaturas vão diminuindo. Isto é explicado pelo arrefecimento do clima, pois de Setembro para Dezembro o clima exterior tendeu sempre a arrefecer.

4.2.3. RESULTADOS PARA O PISO 1 (ZONA 2)

Para o Piso 1 obteve-se o seguinte:

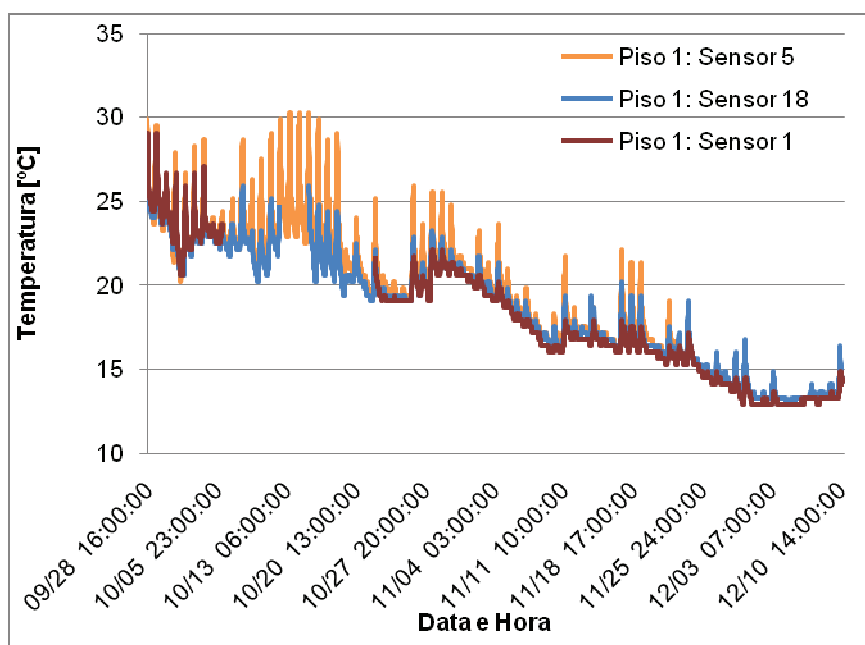


Fig.79 – Gráfico de temperatura para o piso 1.

Neste gráfico apresenta-se as medições das temperaturas para o Piso 1.

Observa-se que as medições são bastantes coerentes, pois as curvas apresentam praticamente o mesmo desenvolvimento.

Observa-se no entanto que o sensor 5 apresenta picos de temperatura mais elevado. Isto pode ser explicado pela localização desse sensor. Este situava-se num quarto intermédio (Quarto 3) e encontrava-se relativamente próximo dos envidraçados, pelo que seria de esperar este apresentar uma temperatura mais elevada que os restantes sensores posicionados nessa zona térmica. O sensor 18 encontrava-se no corredor do piso 1, sendo este afastado de qualquer envidraçado ou clarabóia, fazendo com que este sensor estivesse num local mais fresco. O mesmo aconteceu com o sensor 1. Embora este se encontrasse num quarto (Quarto 1), este estava fixo na parede oposta ao do envidraçado. Sendo este sensor mais afastado do envidraçado que o sensor 5. Outro motivo para o

sensor 1 apresentar temperaturas mais baixas que o sensor 5 é por o sensor 1 estar colocado no quarto situado na extremidade do piso, fazendo com que este quarto seja ligeiramente mais frio que o quarto intermédio devido às trocas térmicas com o exterior.

Observa-se que o sensor 5 deixou de efectuar medições por volta do dia 23 de Novembro. A partir desse dia não foi possível lançar mais esse sensor devido a problema técnico.

Houve igualmente uma paragem de medições no sensor 1 e no 18. A paragem do sensor 1 deu-se na tarde do dia 6 de Outubro. O relançamento desse sensor foi a dia 22 de Outubro. A sua paragem deu-se por motivos alheios. Idem para o sensor 18.

Tal como para o piso 0, observa-se que à medida que o tempo ia passando, as temperaturas iam diminuindo ao aproximarem-se no mês de Dezembro.

Uma vez que o período de medição é razoável, as paragens dos sensores não afectaram as conclusões tiradas na leitura dos gráficos.

A seguir é apresentada o gráfico da humidade relativa para o piso 1:

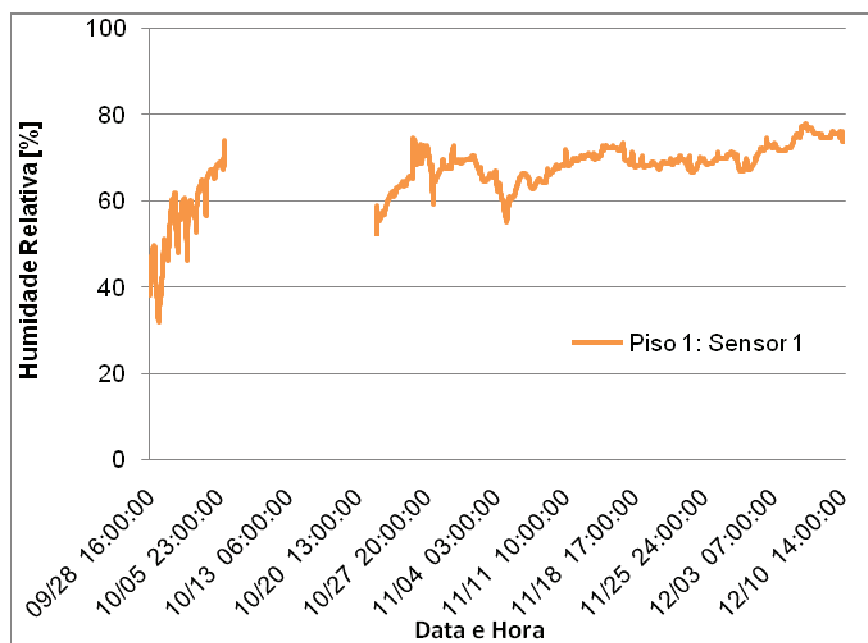


Fig.80 – Gráfico de humidade relativa interior para o piso 1.

O sensor 1 foi o único a medir a humidade relativa nessa zona térmica.

Como referido anteriormente, o sensor 1 teve uma paragem de medições entre o dia 6 de Outubro e dia 22 de Outubro.

De forma geral, pode-se observar que à medida que a temperatura ia diminuindo, a humidade relativa ia aumentando ligeiramente.

4.2.4. RESULTADOS PARA O QUARTO 5 (ZONA 3)

Para o quarto 5 obteve-se o seguinte:

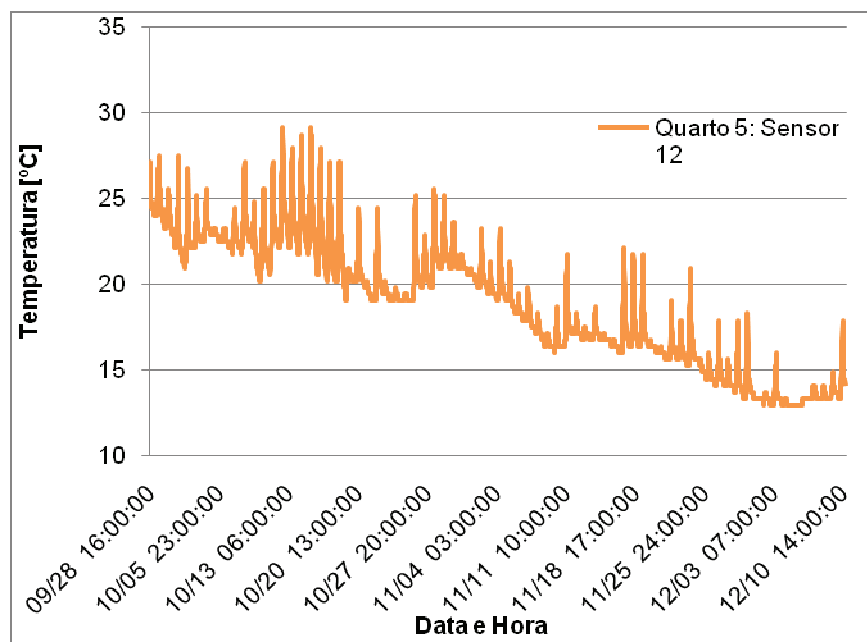


Fig.81 – Gráfico de temperatura para o quarto 5.

Embora só tenha sido colocado um sensor no quarto 5, observa-se que este apresenta um desenvolvimento semelhante ao do quarto intermédio.

Para poder efectuar uma análise mais rigorosa, optou-se por elaborar um gráfico com as temperaturas para o quarto intermédio e o quarto 5. Embora estes sensores façam parte de zonas térmicas diferentes, estes encontravam-se fixos nas mesmas condições (ver Fig.73).

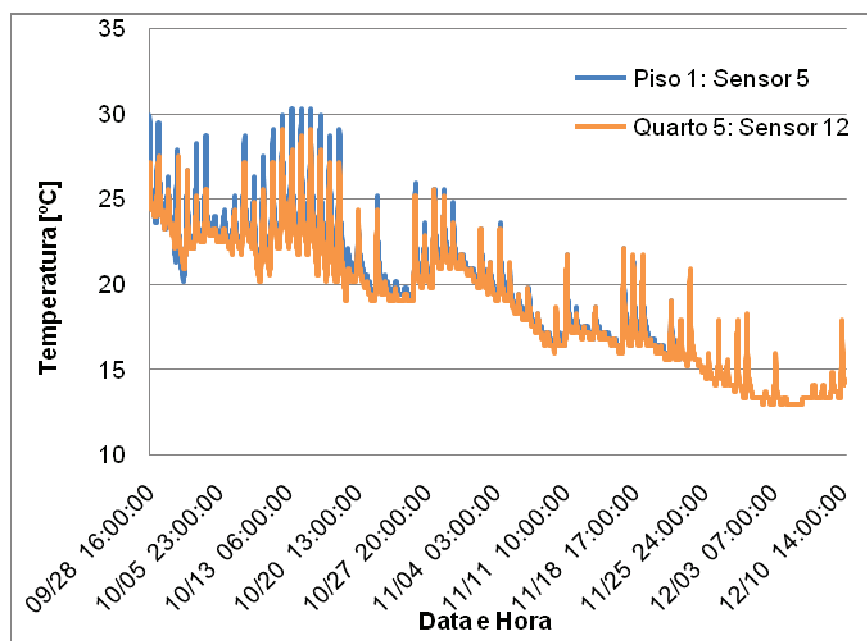


Fig.82 – Gráfico de temperatura para o quarto 5 e o quarto Intermédio.

Observa-se que ambas as curvas têm um desenvolvimento semelhante, o que seria de esperar uma vez que estão disposto de forma semelhante nos respectivos quartos.

Existe uma diferença muito pequena das temperaturas no período de medição inicial. O sensor do quarto intermédio captou uns picos ligeiramente mais altos que no quarto 5, mas a partir do início de Novembro, quando começou o período de chuva, observa-se que as curvas são praticamente coincidentes.

4.2.5. NOTA FINAL.

Tendo uma visão geral do comportamento da moradia unifamiliar quanto as temperaturas e humidades relativas, o próximo passo será a simulação do caso real em estudo com o programa EnergyPlus.

Com a simulação, será então possível comparar as medições obtidas através dos sensores, procedendo assim a validação da utilização do programa para o caso em estudo.

Antes de se proceder à simulação em si, foi ainda necessário definir o ficheiro climático para a zona do Porto com dados climáticos reais para o período pretendido. O subcapítulo 4.3. trata desse assunto.

4.3. DADOS CLIMÁTICOS

4.3.1. FICHEIRO CLIMÁTICO ANUAL DO TIPO TMY

Um formato comum para descrever o clima é o chamado *Typical Meteorological Year (TMY)* ou Ano Típico Meteorológico em português. Este ficheiro contém geralmente dados meteorológicos para 1 ano e é usado em programas de simulação do comportamento higrotérmico de edifícios [17].

A elaboração de um ficheiro deste tipo é feita a partir de várias medições horárias para um dado local. Estas medições estendem-se ao longo de vários anos, pois só assim é possível ter uma ideia geral do clima para o local em estudo [18].

Utilizar uma média dos dados anuais não seria representativo do clima devido à variabilidade dos dados. Sendo assim, para criar o ficheiro, é usado para cada mês do ano do ficheiro *TMY*, o mês mais representativo do clima do local. Por exemplo, para incorporar o mês de Agosto no ficheiro *TMY*, é retirado o mês mais representativo para Agosto dentro das medições feita ao longo dos últimos anos. Este procedimento é aplicado para cada mês do ano do ficheiro *TMY*.

O ficheiro climático possui, além das medições horárias para os meses mais representativos, informações [19] essenciais para a simulação ser o mais credível possível. Estes dados podem ser observados na figura seguinte:

Local (Nome, Latitude, Longitude, Elevação, Hora GMT)	Pressão Atmosférica
Fonte de Dados	Taxa de Humidade
Comentário	Humidade Relativa
Condições de Projecto	Velocidade do Vento
Períodos Típicos/Extremos	Direcção do Vento
Período de Dados	Temperatura do Céu
Férias/Horário de Verão	Radiação Solar (Normal, Global, Difusa)
Graus-Dias	Iluminância (Normal, Global, Difusa)
Ano	Cobertura do Céu (Quantidade de Nuvens)
Mês	Cobertura do Céu Opaco
Dia	Visibilidade
Hora	Temperaturas do Solo (Mensalmente)
Minuto	Observações do Tempo Presente e Códigos (Neve, Chuva)
Temperatura Bolbo Seco	Precipitação
Temperatura Bolbo Húmido	Profundidade de Neve
Temperatura Ponto de Orvalho	Dias desde a Última Queda de Neve

Fig.83 – Dados existentes num ficheiro climático do EnergyPlus.

Este ficheiro climático anual é utilizado para estudar o comportamento de um edifício quanto às suas características higrótérmicas ao longo de um ano.

O EnergyPlus possui alguns ficheiros climáticos do tipo *TMY* para algumas cidades. Para o caso de se efectuar uma simulação anual para uma localização que não esteja no programa, basta aceder ao site do programa EnergyPlus [20] e fazer o download do ficheiro. Aqui é feito o download do ficheiro para a cidade do Porto.

4.3.2. FICHEIRO CLIMÁTICO *REAL-TIME WEATHER*

Existe a possibilidade de utilizar um ficheiro climático com dados meteorológicos reais, ou seja, usar dados climáticos medidos (dados do mês realmente medido e não do mês representativo).

Com este ficheiro, só é possível fazer uma simulação com o período climático existente no ficheiro.

Assim sendo, se é pretendido uma simulação com dados climáticos medidos na primeira semana de um determinado mês, por exemplo, pode-se então fazer o download do ficheiro com o período pretendido para a cidade em estudo no site do programa [21].

Para o presente trabalho foi feito um pedido para download deste ficheiro para a cidade do Porto (Portugal) para o período de 28 de Setembro a 10 de Dezembro de 2009. Ao fazer o pedido, pode-se especificar qual o formato do ficheiro que se pretende receber. Os formatos disponíveis são em *CSV* (ficheiro separado por vírgulas – *Excel*) ou em *IWEC*. Ambos os formatos podem ser convertidos pelo programa EnergyPlus, em *Utilities – Weather* como explicado no subcapítulo 2.4.

Para a cidade do Porto, é usada as medições da estação meteorológica situada no aeroporto em Pedras Rubras (Porto, Portugal).

Após recepção, observou-se que o ficheiro é fragmentado em vários ficheiros. Não foi possível receber um único ficheiro com medições contínuas para o intervalo pretendido. Isso aconteceu porque a estação meteorológica não media continuamente.

Outro problema surgiu com estes ficheiros. Após abertura destes ficheiros no *Excel*, observou-se que os dados estão muito incompletos. Não é apresentada qualquer medição sobre radiação solar. A radiação solar é extremamente importante, uma vez que este é um dos parâmetros que influencia a temperatura no interior de um edifício.

Chegando à conclusão que os dados estavam muito incompletos para o presente trabalho, optou-se por utilizar outra fonte de dados climáticos com medições do tipo *Real-Time*.

4.3.3. DADOS CLIMÁTICOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DA FEUP

A alternativa aos dados *Real-Time Weather* de Pedras Rubras é a estação meteorológica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) do Laboratório de Física das Construções (LFC).

Os dados disponibilizados pela LFC incluem os seguintes parâmetros [22]:

- Temperatura do ar [$^{\circ}\text{C}$];
- Humidade relativa [%];
- Velocidade do vento [m/s];
- Direcção do vento [graus]. O Norte corresponde a 0° e aumenta no sentido dos ponteiros do relógio;
- Pressão atmosférica [bar];
- Radiação solar [W/m^2];
- Precipitação [mm].

Tendo estes dados, é ainda necessário tratar a informação obtida pela estação meteorológica para converter esses dados para um ficheiro climático válido reconhecido pelo EnergyPlus, neste caso, um ficheiro climático com o formato *EPW*.

Para entender melhor como é constituída a estação meteorológica do LFC, apresenta-se a seguir algumas figuras tiradas do site da estação [23]:



Fig.84 – Vista geral da Estação Meteorológica [23].



Fig.85 – Piranómetro – Medição da radiação solar [23].



Fig.86 – Sensor de temperatura e humidade relativa [23].



Fig.87 – Anemómetro – Medição da velocidade e/ou força do vento [23].



Fig.88 – Cata-Vento – Medição da orientação do vento [23].



Fig.89 – Pluviómetro – Medição da precipitação [23].



Fig.90 – Pirgeómetro – Medição da radiação terrestre e atmosférica [23].



Fig.91 – Sistema de aquisição de dados [23].

4.3.4. COMPARAÇÃO DAS MEDIÇÕES "IN SITU" COM AS MEDIÇÕES DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA

Tendo as medições "In Situ" da temperatura e da humidade relativa exterior na obra e tendo os dados da Estação Meteorológica do LFC, achou-se interessante proceder-se a sua comparação.

É de referir novamente que a Estação Meteorológica situa-se na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e que esta situa-se aproximadamente a 6 km da obra em estudo.

Apresenta-se a seguir, a comparação de medições horárias:

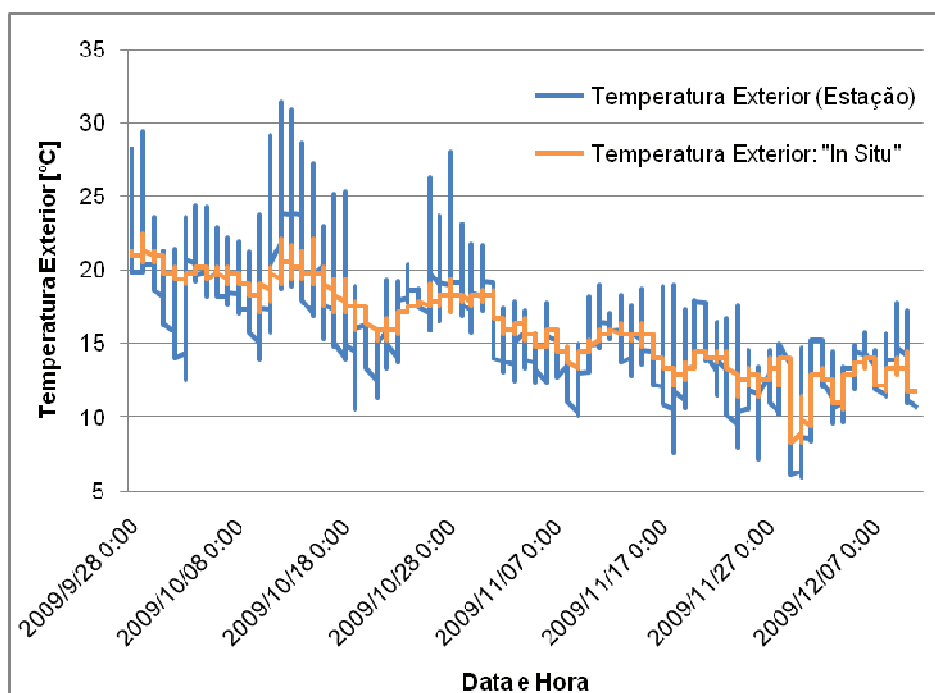


Fig.92 – Medições horárias da temperatura entre a estação e o sensor 15.

Como é possível observar na Fig.92, as temperaturas obtidas pelo sensor 15 apresentam uma evolução semelhante à da estação meteorológica. No entanto obteve-se picos de temperaturas mais elevados na estação. Esta grande diferença de temperatura pode ser justificada pelo facto que o sensor 15 estava num local que não correspondia exactamente à uma situação de clima exterior (ver Fig.72 e Fig.75) enquanto a estação está situada na cobertura do edifício do Departamento de Engenharia Civil da FEUP. Sendo assim, é de esperar diferenças de temperatura entre as duas medições.

Apresenta-se a seguir, o gráfico de medição horária entre a humidade relativa obtida em obra e a humidade relativa obtida através da estação:

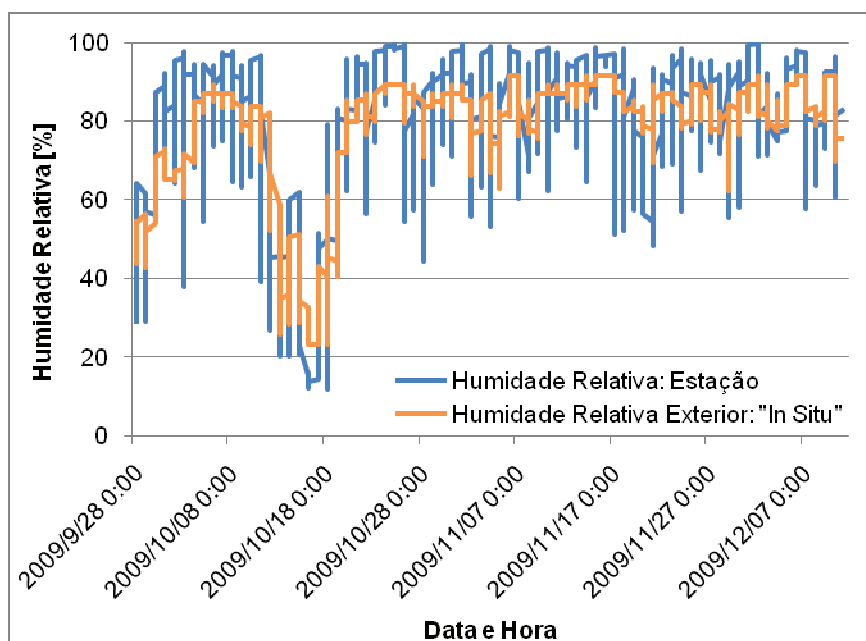


Fig.93 – Medições horárias da humidade relativa entre a estação e o sensor 15.

Tal como para a temperatura, observa-se na Fig.93 que a estação apresenta picos de humidade relativa mais elevados em relação às medições obtidas em obra.

A justificação seria a mesma dada anteriormente, ou seja, devido à localização do sensor 15.

É ainda possível fazer uma comparação de resultados com base na pressão de vapor. A pressão de vapor foi obtida através da temperatura e da humidade relativa. As seguintes fórmulas mostram como se chega a pressão de vapor [24]:

$$P_s = 611 \cdot e^{\left(\frac{a \cdot t}{t' + t}\right)} \quad (4)$$

$$P_v = P_s \times HR \quad (5)$$

Em que:

P_s - Pressão de saturação [Pa]

e - Número de Nepper - $e \cong 2,718$

t - Temperatura [°C]

$a = 22,44$, $t' = 272,44$ °C (para $t < 0$ °C)

$a = 17,08$, $t' = 234,18$ °C (para $t \geq 0$ °C)

P_v - Pressão de vapor [Pa]

HR - Humidade relativa [%]

Apresenta-se de seguida o gráfico da pressão de vapor para o sensor 15 e a estação meteorológica:

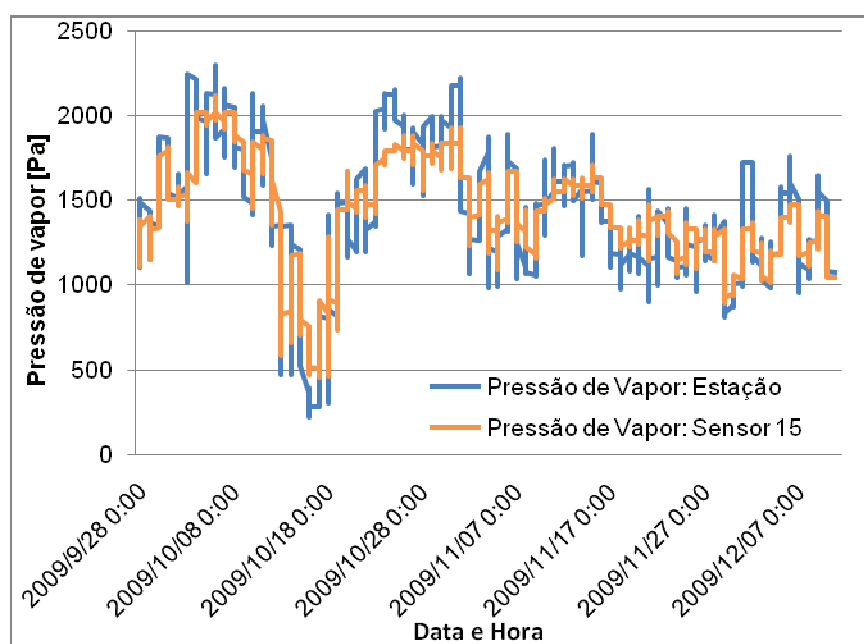


Fig.94 – Comparação de pressão de vapor entre a estação e o sensor 15.

Pela Fig.94, observa-se que, ambas as curvas apresentam o mesmo desenvolvimento. A curva de pressão de vapor da estação obteve picos mais altos em relação à curva de pressão de vapor medido.

Aqui acontece o mesmo que no gráfico da Fig.92 e no gráfico da Fig.93. A estação obteve picos mais elevados em relação às medições devido à localização do sensor 15.

4.4. CRIAÇÃO DO FICHEIRO CLIMÁTICO

Tendo os dados todos necessários, pode-se então criar um ficheiro climático para a simulação.

Para criar o ficheiro climático, é preciso recorrer ao ficheiro climático do tipo *TMY* para a cidade do Porto. Este ficheiro contém informação importante para o programa EnergyPlus poder correr a simulação. Este ficheiro servirá então de base aquando da modificação dos dados necessários.

Para a elaboração do ficheiro climático, é necessário ainda calcular alguns dados em falta no ficheiro facultado pelo LFC. Estes dados são:

- *Dew Point Temperature* (Temperatura Ponto de Orvalho);
- *Direct Normal Radiation* (Radiação Directa Normal).

Para se proceder ao cálculo da Temperatura Ponto de Orvalho, é necessário ter os seguintes valores:

- Humidade Relativa (*HR*);
- Temperatura.

A obtenção da Temperatura Ponto de Orvalho (T_d) é calculada pela seguinte fórmula [25]:

$$T_d = \frac{b \times \gamma(T, HR)}{a - \gamma(T, HR)} \quad (6)$$

Onde:

$$\gamma(T, HR) = \frac{a \times T}{b - T} + \ln\left(\frac{HR}{100}\right) \quad (7)$$

$$a = 17,271$$

$$b = 237,7^\circ\text{C}$$

Esta fórmula é válida para as seguintes condições:

- $0^\circ\text{C} < T < 60^\circ\text{C}$;
- $1\% < HR < 100\%$;
- $0^\circ\text{C} < T_d < 50^\circ\text{C}$.

Tendo a Temperatura Ponto de Orvalho calculada, passa-se agora ao cálculo da Intensidade da Radiação Directa Normal.

Para a obtenção da Intensidade da Radiação Directa Normal (I_i), é necessário os seguintes dados:

- Intensidade da Radiação Difusa em Superfície Horizontal (I_{dh});
- Intensidade da Radiação Global em Superfície Horizontal (I_{gh});
- Altura solar (h).

Segue então a seguinte fórmula para o cálculo da Intensidade da Radiação Directa Normal [26]:

$$I_i = \frac{I_{gh} - I_{dh}}{\text{sen}(h)} \quad (8)$$

Tendo os dados em falta calculados, é então possível transferir estes dados para o ficheiro climático *TMY* do Porto, previamente transferido do site do programa.

Substituem-se, no ficheiro climático, os valores referentes à:

- Temperatura;
- Humidade Relativa;
- Temperatura Ponto de Orvalho;
- Intensidade da Radiação Global em Superfície Horizontal;
- Intensidade da Radiação Difusa em Superfície Horizontal;
- Intensidade da Radiação Directa Normal.

Os restantes dados do ficheiro climático *TMY* do Porto mantêm-se inalterados, pois estes pouco influenciam a simulação uma vez que já são usados dados de referência para a cidade do Porto. Aqui o essencial é ter dados correctos da radiação solar, da temperatura e da humidade relativa exterior. Pois estes são factores importantes que têm grande influência na simulação da habitação unifamiliar em estudo.

Assim sendo, o ficheiro climático fica pronto a ser utilizado para a simulação do caso em estudo.

5

RESULTADOS, COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO

5.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO CASO EM ESTUDO

5.1.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO: ERROS E AVISOS

Neste Capítulo 5 apresenta-se os resultados da simulação e as comparações entre as medições “*In Situ*” e a simulação do caso em estudo.

Assim, após ter criado o ficheiro climático, já se pode proceder à simulação da habitação unifamiliar.

A seguir apresenta-se o resultado da simulação quanto a erros e avisos:

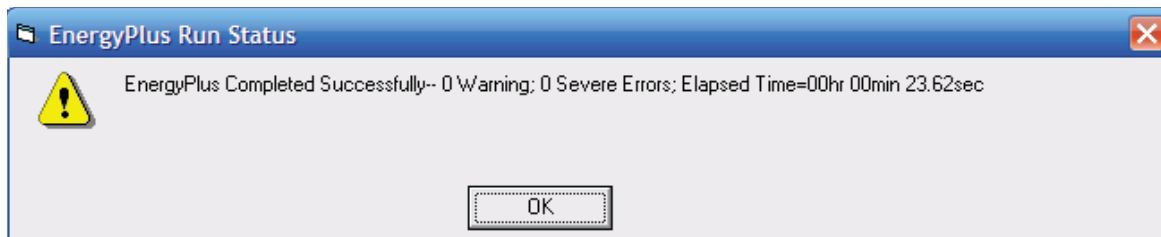


Fig.95 – Resultados da simulação quanto a erros e avisos.

Segundo o programa, não se obteve qualquer erro nem aviso, pelo que o preenchimento dos campos deve ter sido aparentemente correcto.

Para confirmar que a geometria do modelo esteja correcta e para confirmar que não falta nenhum elemento como um envidraçado ou clarabóia, é pedido ao programa para este apresentar o *Drawing File* na interface do EP-LAUNCH. O *Drawing File* é um ficheiro do tipo *CAD*.

A seguir apresenta-se as diferentes vistas do modelo geométrico do caso em estudo.

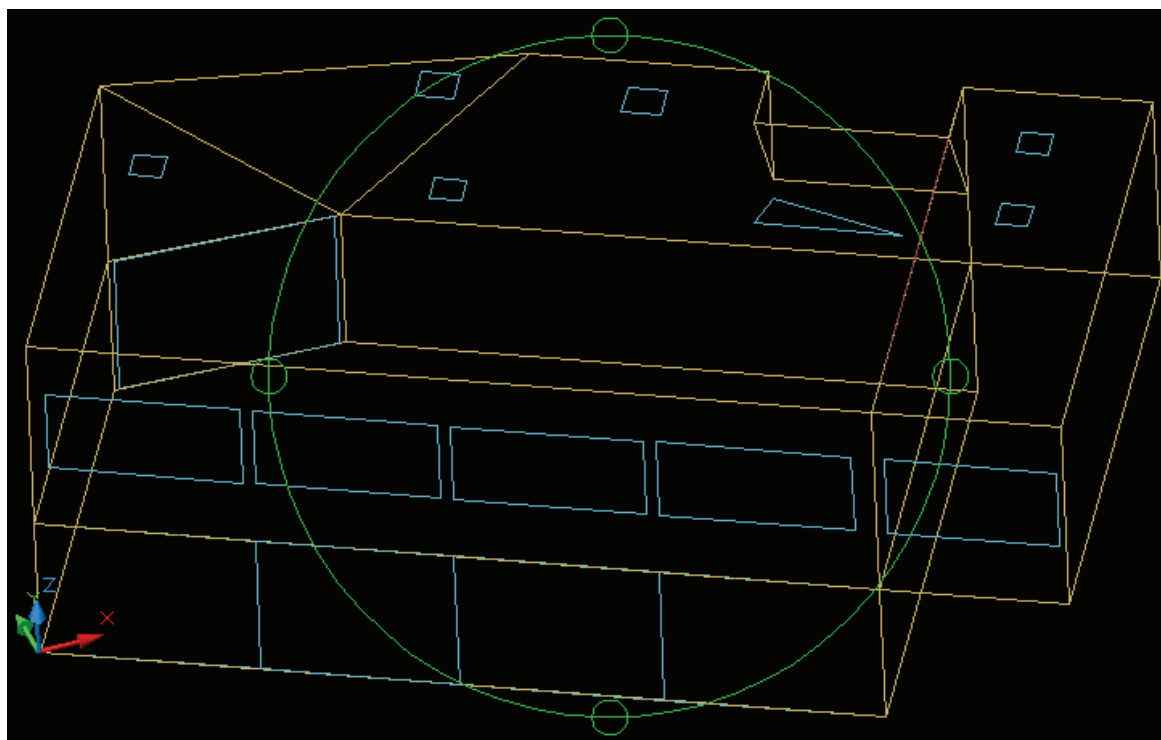


Fig.96 – Modelo geométrico do caso em estudo – Alçado Sudoeste.

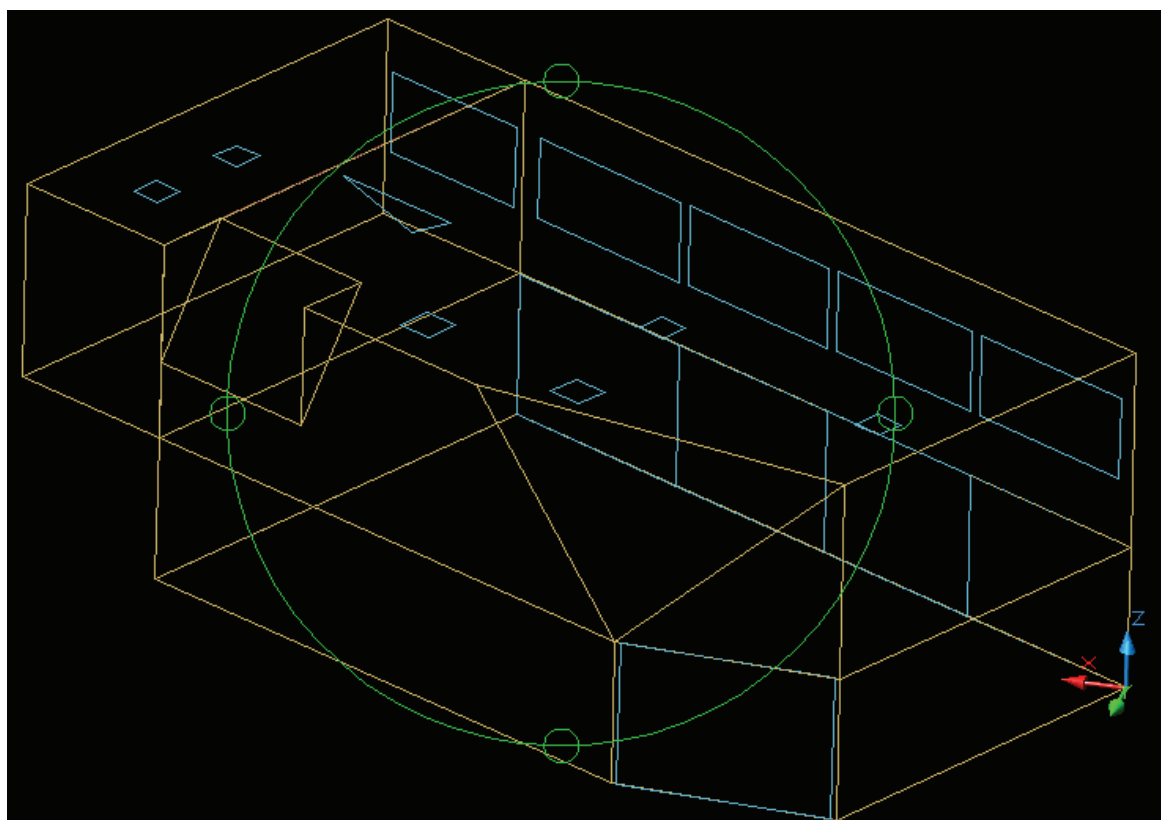


Fig.97 – Modelo geométrico do caso em estudo – Alçado Nordeste.

Observando a Fig.96 e Fig.97 e comparando-as com os alçados (Fig.38 e Fig.39) e a planta da cobertura (Fig.45), chega-se à conclusão que a geometria está correcta e portanto as coordenadas foram bem introduzidas.

Sendo assim, pode-se prosseguir com os resultados.

5.1.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

É apresentado a seguir o gráfico de resultados da simulação para as três zonas térmicas em estudo:

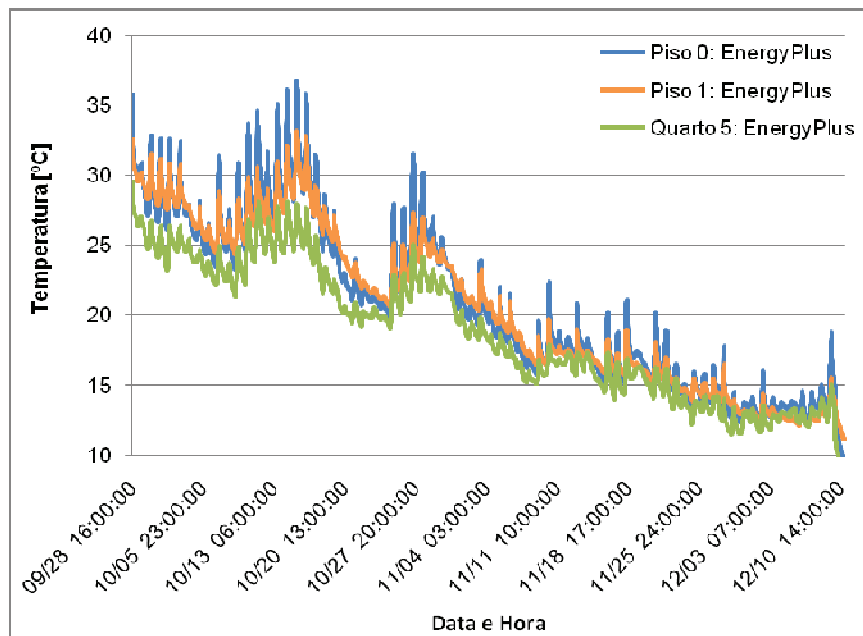


Fig.98 – Resultados da simulação para as diferentes zonas térmicas.

Como é possível observar na Fig.98, repara-se que as curvas apresentam uma evolução semelhante. De uma forma geral observa-se que, à medida que o tempo vai passando, a temperatura foi diminuindo. Este comportamento é natural uma vez que as medições tiveram início em fim de Setembro (Outono) e acabaram em meados de Dezembro (Inverno).

A curva de resultados do piso 0 obteve picos de temperatura mais elevados em relação às restantes zonas, provavelmente porque este apresenta uma maior área de envidraçados. Quanto maior é a área de envidraçados, maior será o ganho solar.

O quarto 5, apresenta temperaturas mais baixas que as restantes zonas térmicas. Esta diferença pode ser explicado pela área total de envidraçado, que é muito menor que as restantes zonas.

Mas para se proceder a uma análise mais crítica destes resultados, é feita a comparação dos resultados obtidos através da simulação com as medições dos sensores. Esta comparação é feita no subcapítulo 5.2.

5.2. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

5.2.1. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O PISO 0

No subcapítulo 5.2. apresenta-se as comparações entre as medições “*In Situ*” e a simulação em relação a cada zona térmica estudada.

Assim, apresenta-se a seguir as comparações para o piso 0:

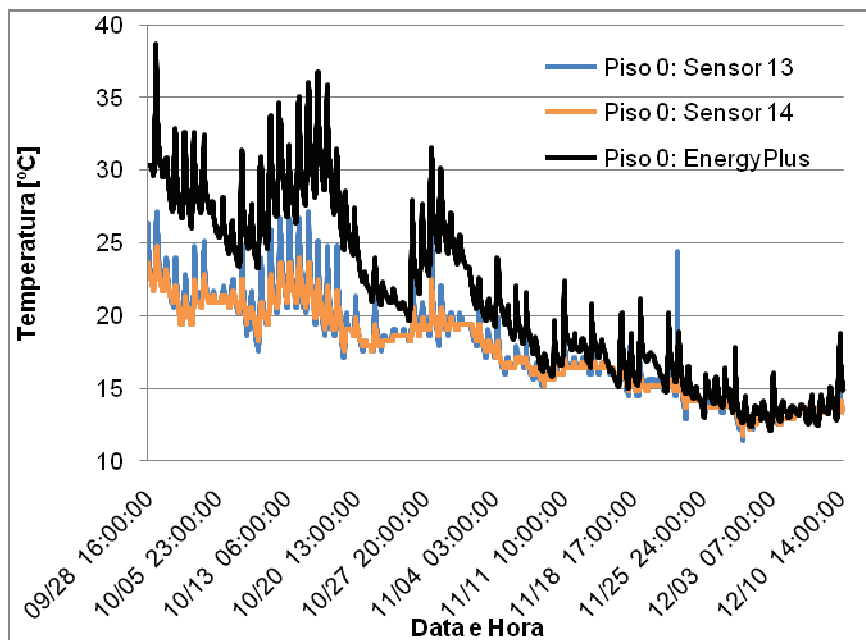


Fig.99 – Comparação de resultados da temperatura para o piso 0.

Observando a Fig.99, repara-se que a simulação apresenta temperaturas mais elevadas logo no início do período de medição. Mas a partir do mês de Novembro, a curva da simulação aproxima-se até praticamente coincidir com as medições realizadas no local. A aproximação, como referido anteriormente, dá-se no início de Novembro, o que corresponde a época de chuvas observadas nessa altura. A simulação traduziu correctamente situações de ganhos solares significativos. Uma justificação plausível para esta situação é o facto de a habitação ter apresentado os envidraçados com sujidade, pois uma vez que os trabalhos de acabamentos estavam a decorrer no período de medições, este factor poderá ter influenciado a quantidade de radiação solar recebida pelos envidraçados.

Para visualizar melhor os resultados, focou-se o gráfico da Fig.99 para o período em que as curvas se aproximam, ou seja, de Novembro para Dezembro:

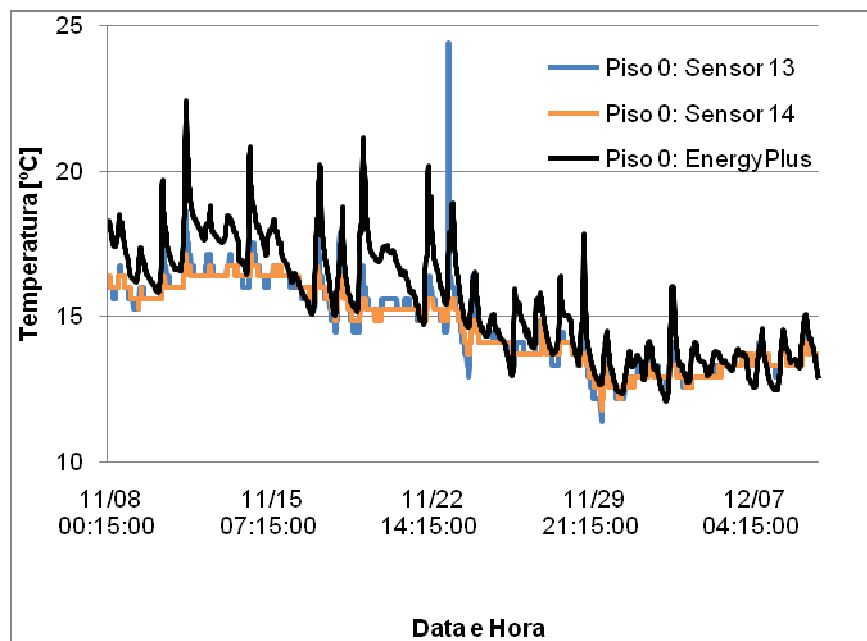


Fig.100 – Comparação de Novembro a Dezembro para o piso 0.

Observando melhor a Fig.100, conclui-se que efectivamente as curvas praticamente coincidem nos dias mais frios, afastando-se nos picos máximos.

Outra alternativa para apresentação dos resultados da Fig.100 é a representação na forma estatística, ou seja, frequências acumuladas para o período de Novembro a Dezembro:

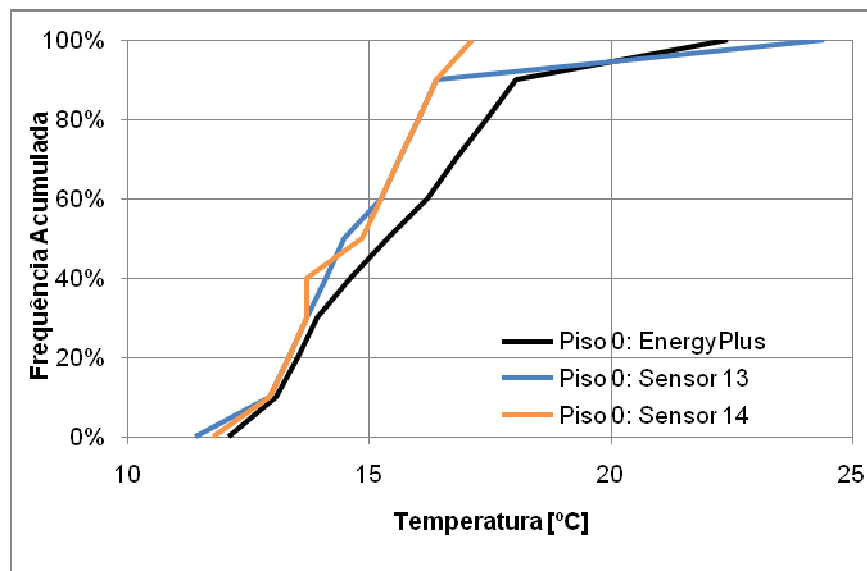


Fig.101 – Frequências acumuladas da temperatura para o piso 0.

Pode-se observar que em termos de média, as curvas se afastam, o que significa que as médias se afastam igualmente, no entanto os valores mínimos de temperaturas são muito próximas.

Para os valores máximos de temperatura, observa-se que o valor máximo do sensor 13 está próximo do valor da simulação enquanto o valor máximo do sensor 14 afasta-se dos valores máximos da simulação e do sensor 13. Este afastamento pode ser explicado, como já referido no subcapítulo 4.2.2., devido a localização do sensor 14, pois este encontra-se à sombra e afastado de qualquer radiação solar. Factor este que influencia as temperaturas máximas.

5.2.2. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O PISO 1

Em relação ao Piso 1, é feita a comparação para a temperatura interior, entre as medições e a simulação.

É feita igualmente a comparação da humidade relativa interior com a simulação.

Apresenta-se a seguir as comparações para a zona térmica do Piso 1:

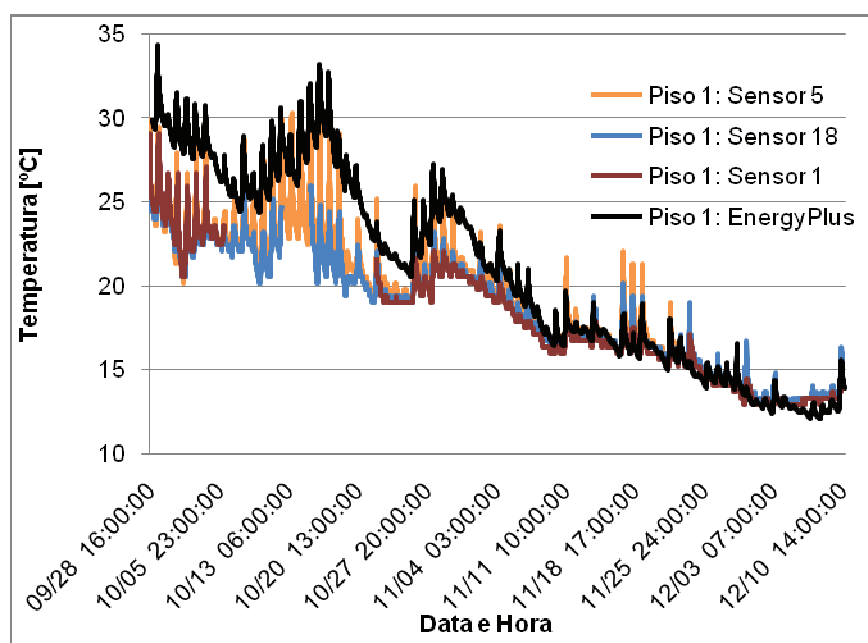


Fig.102 – Comparação de resultados da temperatura para o piso 1.

Ao observar o gráfico da Fig.102, conclui-se que existe uma diferença de temperaturas no início do período de medições mas que, a partir do mês de Novembro, as temperaturas simuladas têm tendência a coincidir com as temperaturas obtidas pelos sensores. Este fenómeno é idêntico ao observado para o piso 0.

Para se observar com mais detalhe as temperaturas simuladas e medidas no período onde as curvas se juntam, apresenta-se a Fig.103:

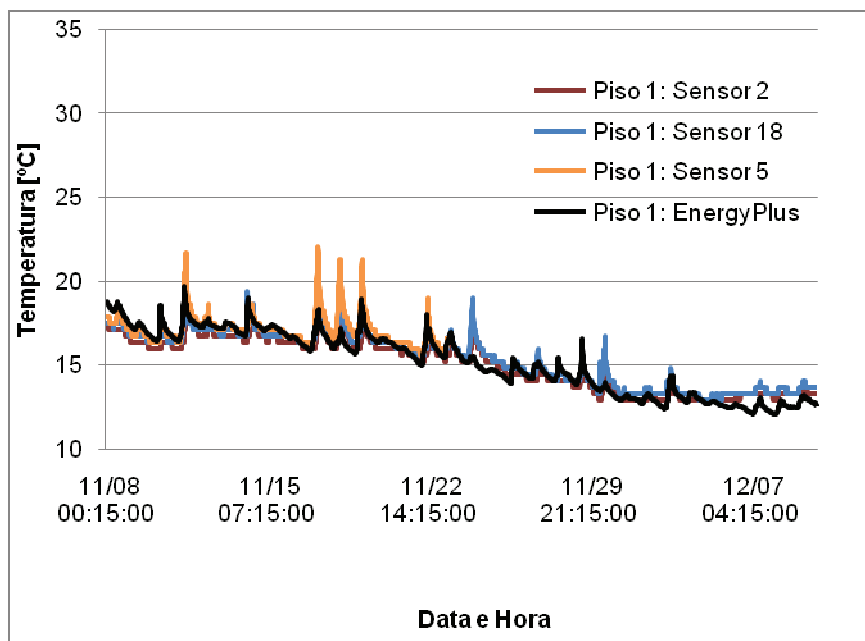


Fig.103 – Comparação de Novembro a Dezembro para o piso 1.

Pela Fig.103 observa-se mais detalhadamente que realmente as curvas estão praticamente coincidentes. Chega-se então à conclusão que as temperaturas simuladas correspondem às medidas.

A Fig.104 mostra de forma estatística essa comparação para o período de Novembro a Dezembro:

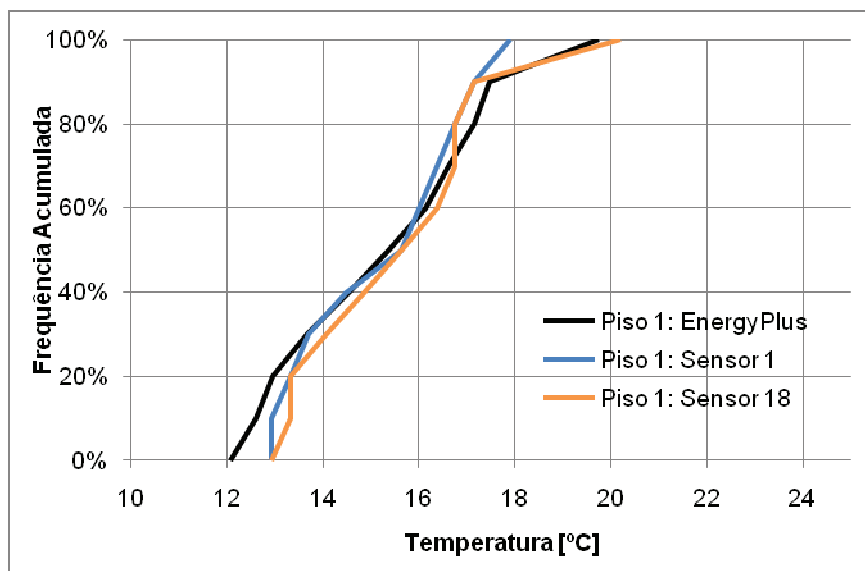


Fig.104 – Frequências acumuladas da temperatura para o piso 1.

Pela Fig.104 observa-se que as curvas apresentam um desenvolvimento muito semelhante e que os sensores e a simulação apresentam temperaturas mínimas e máximas próximas.

Tira-se igualmente que a média dos valores são próximas entre as medições e a simulação.

É de referir que a curva do sensor 5 não foi apresentada na Fig.104 por falta de medições. Como referido no subcapítulo 4.2.3., o sensor 5 teve um problema técnico pelo que este deixou de efectuar as respectivas medições.

Em relação a humidade relativa, obteve a seguinte comparação de resultados:

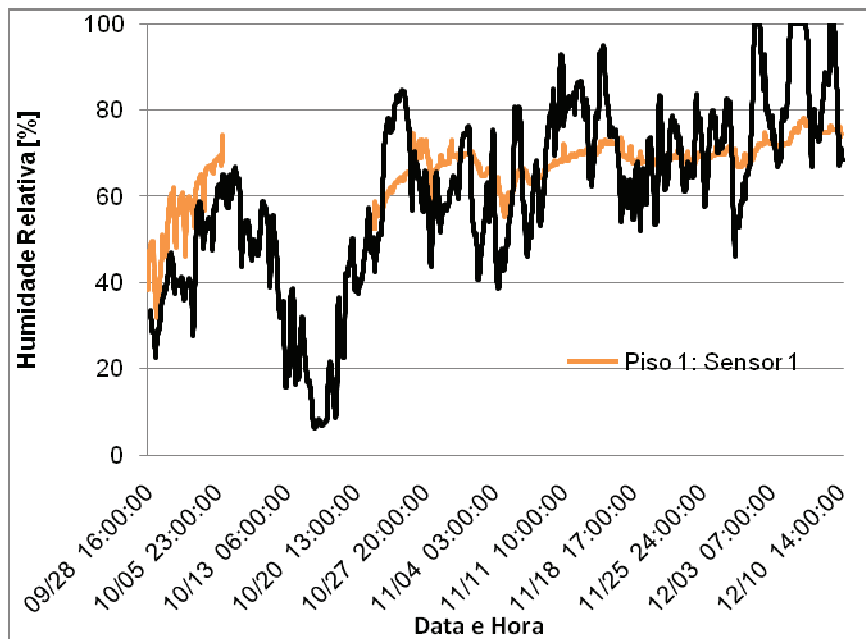


Fig.105 – Comparação de resultados da humidade relativa para o piso 1.

A Fig.105 mostra claramente que a curva simulada para a humidade relativa apresenta picos mais evidenciados do que em relação a curva medida com o sensor 1. Observa-se que o sensor 1 mediu de forma relativamente constante enquanto o EnergyPlus simulou a humidade relativa com picos.

Para entender melhor esta comparação, é apresentado a seguir a curva de frequência acumulada para esta situação:

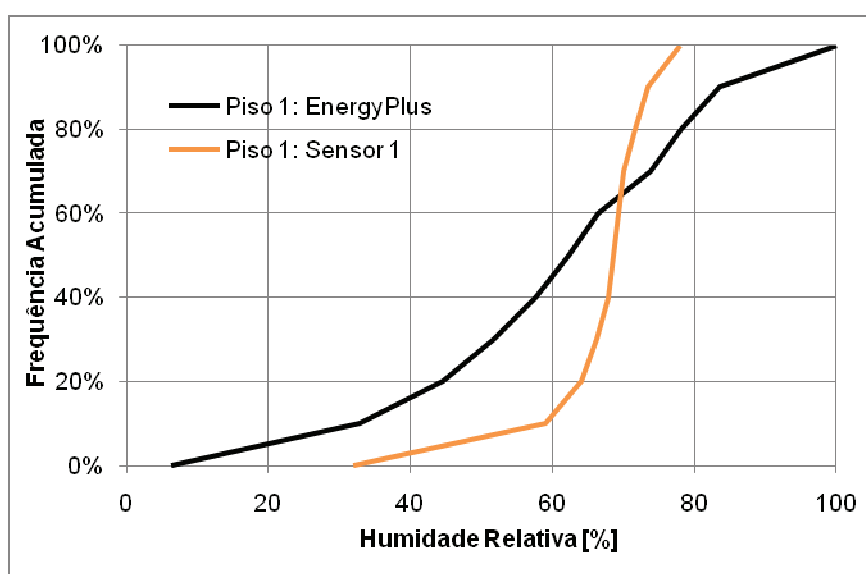


Fig.106 – Frequências acumuladas da humidade relativa para o piso 1.

Pela Fig.106 observa-se que as humidades relativas máximas e mínimas obtidas pela simulação e pelas medições afastam-se bastante. No entanto, as curvas interceptam-se um pouco acima dos 60%, pelo que estatisticamente, a média dos valores não se afastam muito.

É ainda possível fazer uma comparação de resultados com base na pressão de vapor.

Apresenta-se a seguir, o gráfico da pressão de vapor obtido através da humidade relativa e da temperatura para o piso 1:

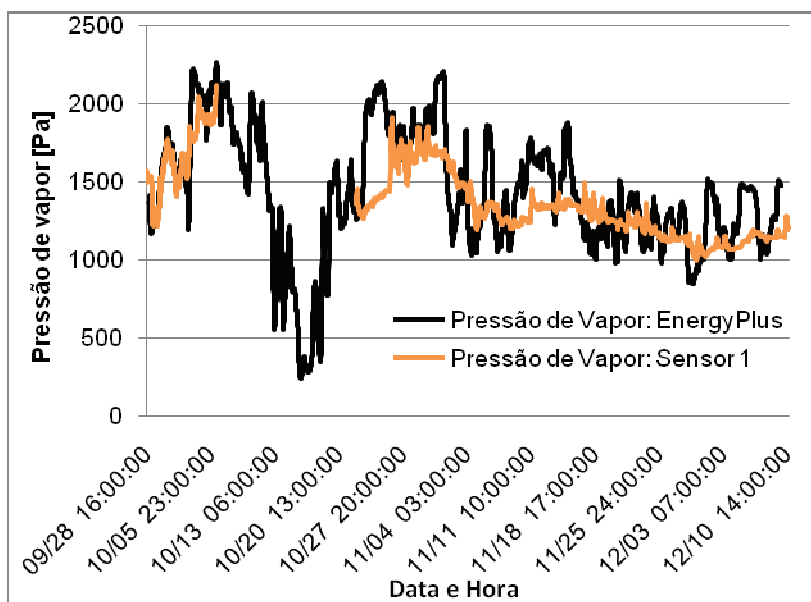


Fig.107 – Comparação de pressão de vapor para o piso 1.

Pela Fig.107, observa-se que a curva de pressão de vapor simulado obteve picos mais altos em relação à curva de pressão de vapor medido.

Esta situação pode ser explicada pelo efeito da inércia higroscópica não ter sido introduzido na simulação.

É importante referir que o EnergyPlus simula a humidade relativa para a zona térmica toda. No entanto a comparação é feita apenas com a medição da humidade relativa de um sensor colocado apenas num dos espaços da zona, pelo que se deveria ter colocado mais sensores de humidade relativa. Assim, tendo mais sensores distribuídos pela zona, seria possível analisar o comportamento geral da zona toda e não de apenas de um quarto.

5.2.3. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA O QUARTO 5

Para o quarto 5, é feita novamente a comparação entre a simulação e as medições:

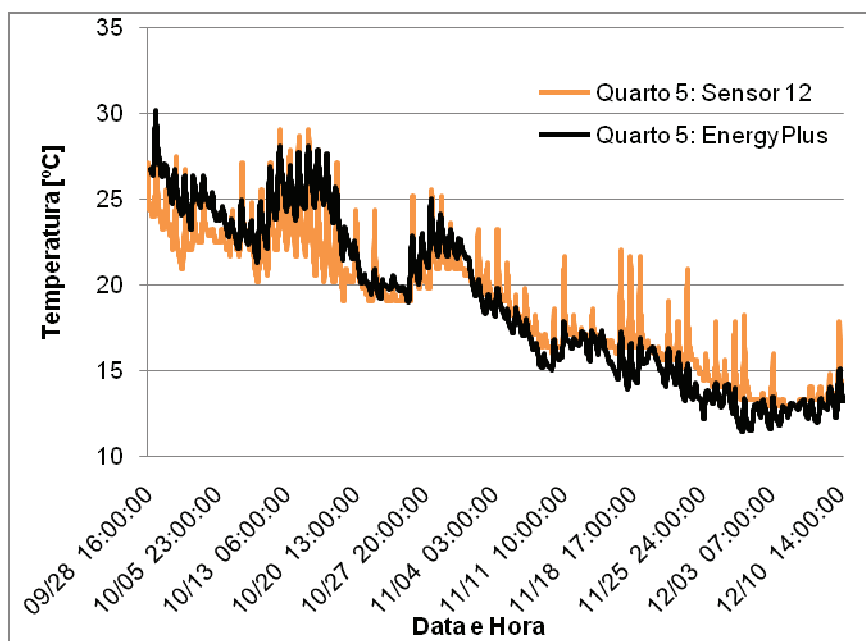


Fig.108 – Comparação de resultados da temperatura para o quarto 5.

Pela observação da Fig.108, repara-se que ambas as curvas têm um desenvolvimento semelhante.

Conclui-se que o EnergyPlus simulou o comportamento da zona de forma semelhante à obtida através do sensor.

Para confirmar esta conclusão, é apresentado a seguir o gráfico das frequências acumuladas para o quarto 5:

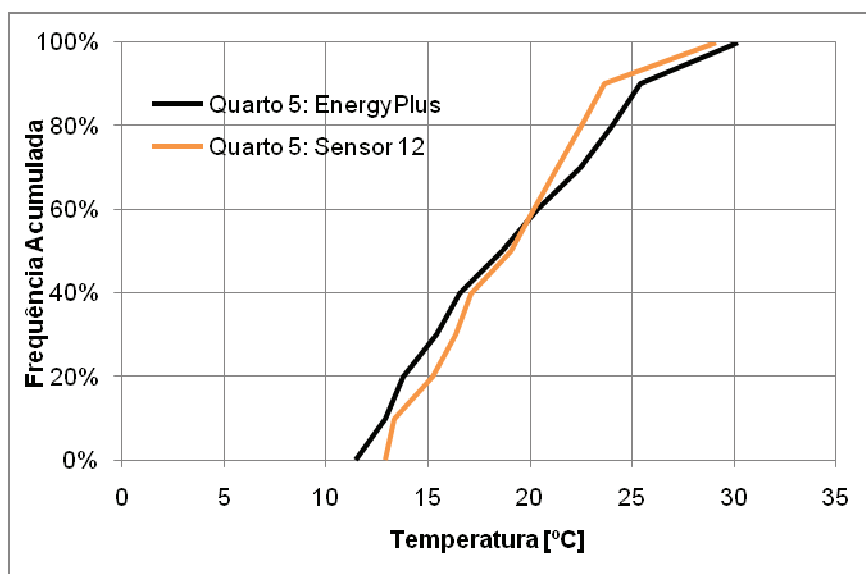


Fig.109 – Frequências acumuladas da temperatura para o quarto 5.

Observando a Fig.109 conclui-se que a simulação e as medições do sensor 12 apresentam um valor máximo da temperatura muito próxima. Em relação ao valor mínimo existe alguma diferença, mas no entanto, a média dos valores de ambas as curvas são muito próximas.

Observa-se igualmente que ambas as curvas apresentam uma evolução semelhante, tal como observado na Fig.108.

5.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Neste subcapítulo é apresentado uma pequena análise de sensibilidade. Esta análise engloba dois factores importantes envolvidos na simulação:

- Ventilação natural;
- Factor solar dos envidraçados.

É feita esta análise por dois motivos.

O primeiro motivo envolve a ventilação natural. Como referido no subcapítulo 3.3.8., é utilizado um valor base para a taxa de renovação horária, ou seja, $0,8 \text{ h}^{-1}$. Na realidade, não se sabe o valor exacto dessa taxa. Assim sendo, os resultados da simulação podem ser influenciados, pelo que seria mais correcto proceder a um ajuste do valor da taxa de renovação horária.

O segundo motivo envolve o factor solar dos envidraçados. Embora esse valor seja conhecido, é feito um ajuste deste valor devido à sujidade existente nos envidraçados. Como referido várias vezes, a obra encontrava-se em fase de acabamentos aquando do desenvolvimento deste trabalho, pelo que os envidraçados encontravam-se com alguma sujidade.

Assim sendo, achou-se relevante ajustar estes dois parâmetros para se proceder a comparação de resultados entre a simulação e as medições efectuadas "In Situ".

5.3.1. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE: VENTILAÇÃO NATURAL

Para se proceder ao ajuste do valor da taxa de renovação horária, foram feitas várias tentativas de simulação. A cada simulação, será possível observar se os resultados se aproximam ou se afastam das medições.

É importante referir novamente que, aquando do desenvolvimento deste trabalho, a habitação unifamiliar não apresentava portas interiores nem porta de entrada, pelo que existia constantemente correntes de ar. A entrada da habitação era fechada por um contraplacado. Assim sendo, a taxa de renovação horária deve ser superior aos $0,8 \text{ h}^{-1}$ inicialmente utilizados na simulação base da habitação.

Tendo em conta que a habitação não apresentava portas, optou-se por subir o valor da taxa da renovação horária para o valor de $1,2 \text{ h}^{-1}$ para todas as zonas térmicas.

Apresenta-se apenas, por simplicidade, as comparações das temperaturas entre a simulação (com um novo valor de RPH) e as medições.

Assim, obteve-se o seguinte para o piso 0:

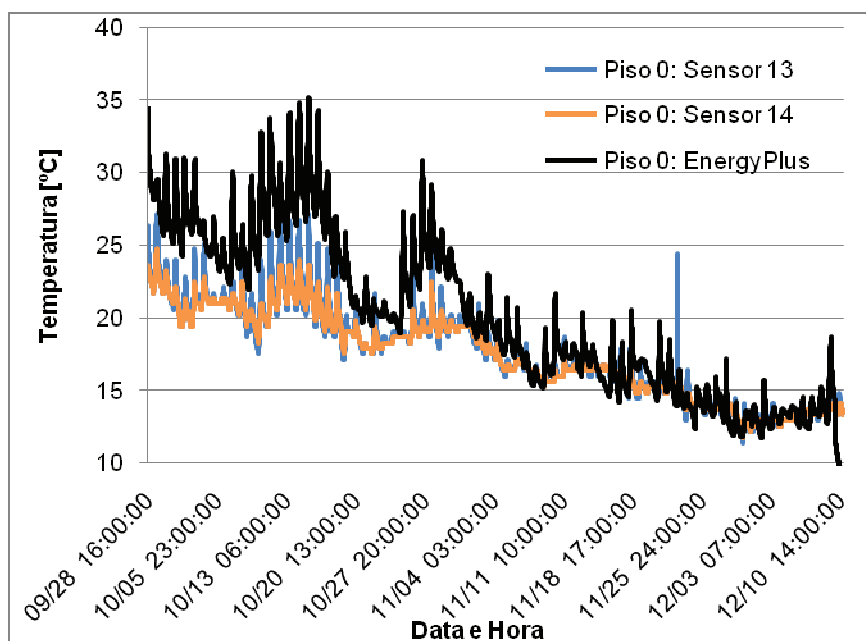


Fig.110 – Resultados da temperatura para o piso 0 e com RPH=1,2

De uma forma geral, há uma aproximação das temperaturas obtidas pela simulação em relação as medições. Observa-se que as curvas ainda se mantêm praticamente coincidentes a partir de Novembro.

Mas como ainda não se obteve o resultado pretendido, deve-se aumentar o valor da taxa de renovação horária para o piso 0.

Para o piso 1, obteve-se o seguinte:

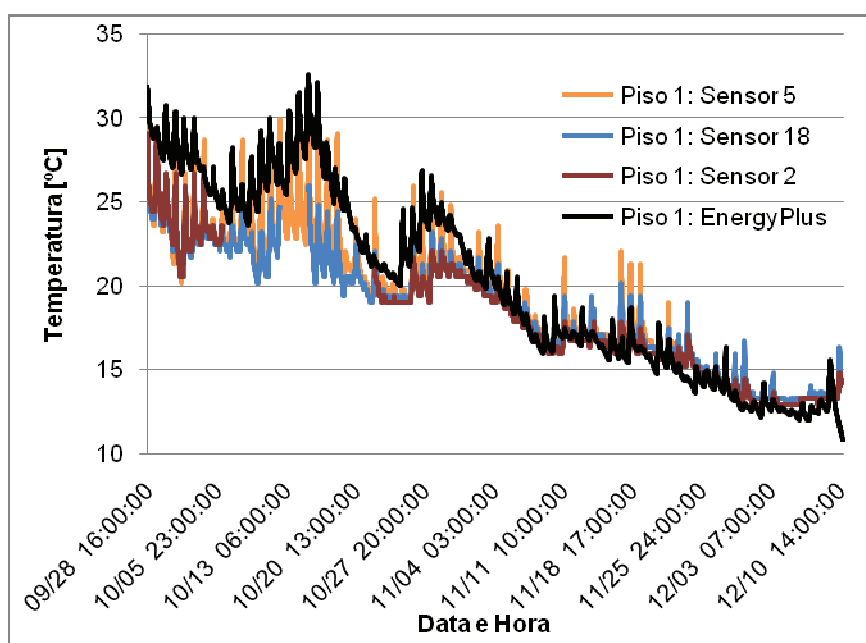


Fig.111 – Resultados da temperatura para o piso 1 e com RPH=1,2

Pela observação do gráfico repara-se que, tal como no piso 0, há uma aproximação das temperaturas obtidas através da simulação e entre as medições para o início do período de medições. No entanto, há um ligeiro afastamento das curvas a partir de Novembro.

Aqui, se aumentar a taxa de renovação horária, a curva da simulação irá tender a afastar-se das medições para o período de Novembro a Dezembro.

Para o quarto 5, obteve-se o seguinte:

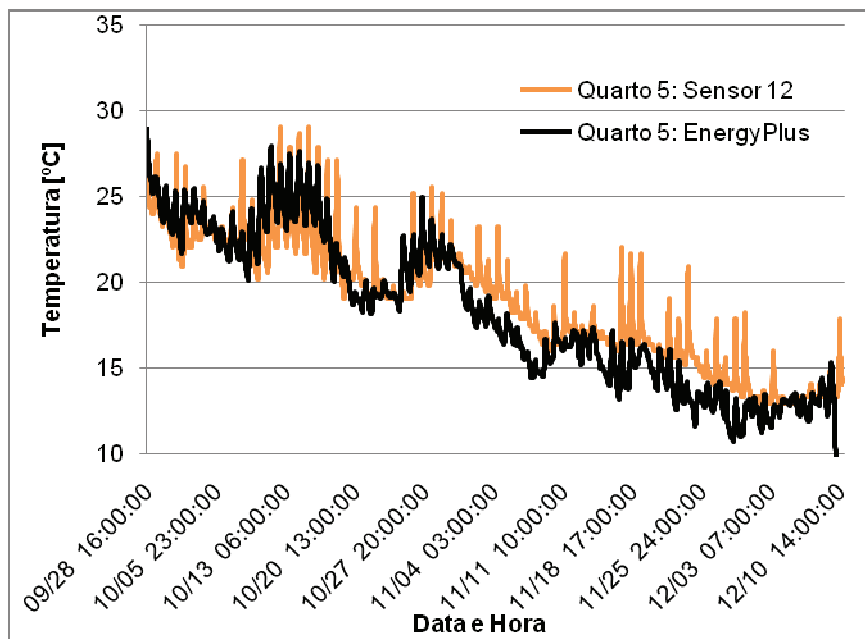


Fig.112 – Resultados da temperatura para o quarto 5 e com RPH=1,2.

Observa-se que o facto de ter aumentado a taxa de renovação horária na zona fez com que as curvas coincidisse praticamente no início do período de medições. No entanto observa-se igualmente que as curvas tendem a afastar-se no início de Novembro.

Observando a simulação base (ver Fig.108), obteve-se resultados próximos aos medidos. No entanto, há um ligeiro afastamento entre as curvas.

Como no quarto 5 acontece a situação inversa aos pisos 0 e 1, ou seja, para o quarto 5 as curvas coincidem no início e afastam-se no fim, é admitida uma redução do valor inicial da taxa de renovação horária. Essa redução é justificada igualmente pelo facto desta zona, o quarto 5, não se encontrar tão ventilada como para o piso 0.

Procede-se agora a um ajuste do valor da taxa de renovação horária, por zona.

Para o piso 0, é adoptado um valor de 2 h^{-1} . Embora esse valor seja elevado em condições normais, é usado esse valor devido às condições no local, ou seja, pelas correntes de ar (devido a falta de portas e pelos envidraçados que estão ocasionalmente abertos durante o dia).

Para o piso 1, mantém-se o valor de $1,2 \text{ h}^{-1}$.

Para o quarto 5, é adoptado o valor de $0,6 \text{ h}^{-1}$.

Embora estes valores sejam muito diferentes entre si, decidiu-se apenas utilizar estes valores a fim de se proceder à comparação. No entanto, embora estes valores sejam puramente teóricos, poderá na realidade existir diferenças de taxas de renovação horária devido às condições no local.

A seguir, apresentam-se os gráficos, por zona, para o respectivo valor da taxa de renovação horária:

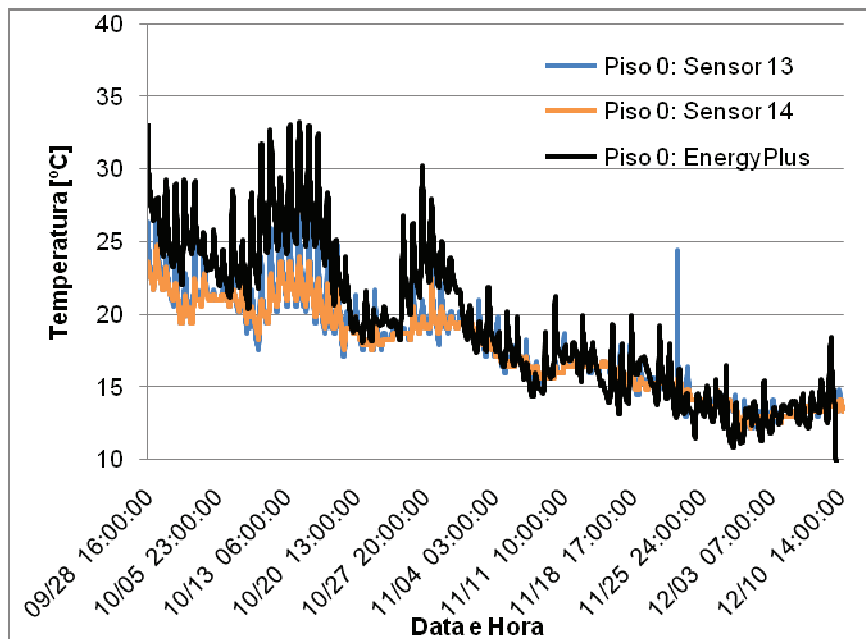


Fig.113 – Resultados da temperatura para o piso 0 e com RPH=2.

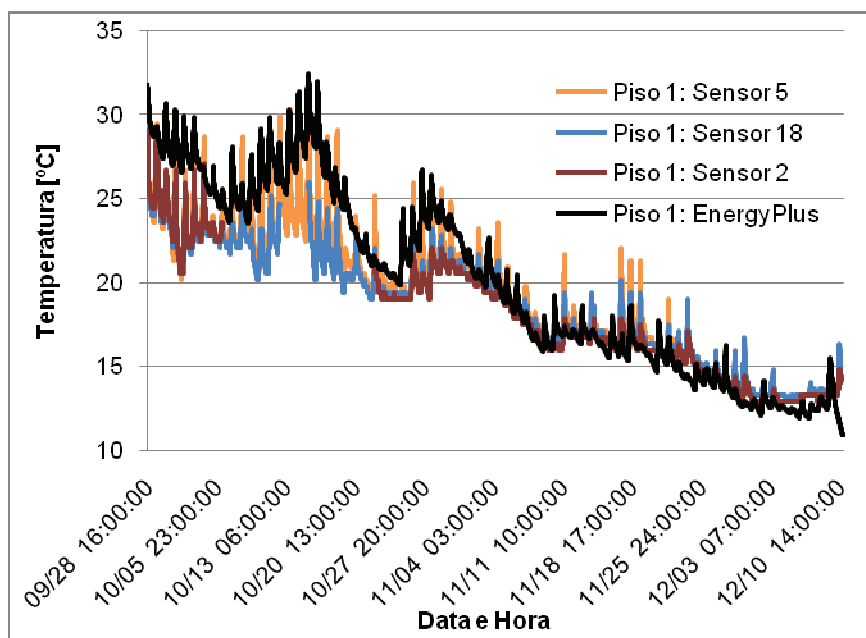


Fig.114 – Resultados da temperatura para o piso 1 e com RPH=1,2.

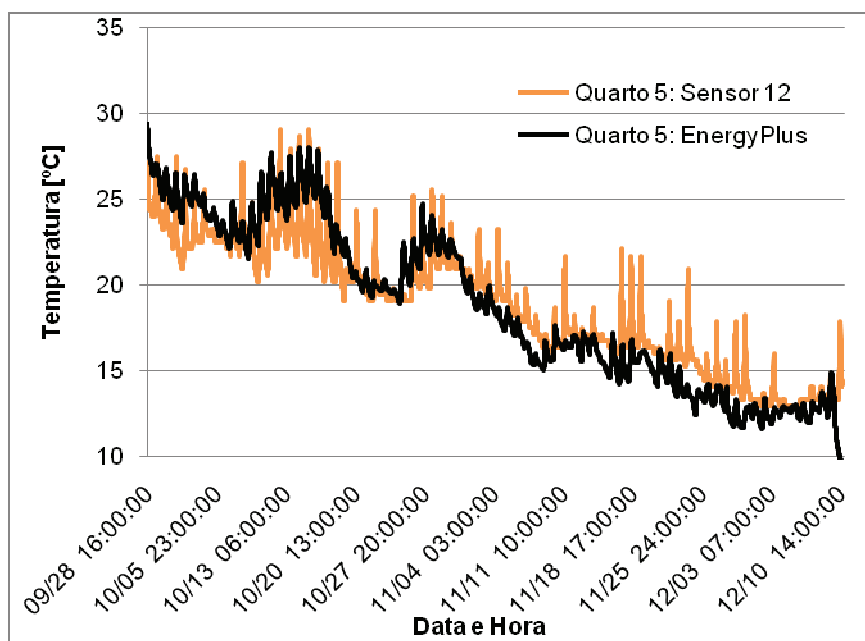


Fig.115 – Resultados da temperatura para o quarto 5 e com RPH=0,6.

Pela análise da Fig.113, Fig.114 e Fig.115, observa-se que houve um melhoramento dos resultados, ou seja, a curva da simulação aproximou-se em relação às medições, pelo que se conclui que a ventilação natural tenha o seu contributo nos resultados da simulação. No entanto não se obteve uma coincidência desde o início do período de medições até ao fim.

Aumentado o valor da taxa da renovação horária para o piso 0 não faria muito sentido, uma vez que 2 h^{-1} já é considerado elevado.

O que não faria sentido é ter valores muito diferentes entre zonas, pois como não havia portas interiores, o ar circulava entre zonas com facilidade.

Sendo assim chega-se à conclusão que, embora a ventilação influencie os resultados da simulação, há outros factores que influenciam os resultados.

Um desses factores, é a sujidade dos envidraçados que pode ser considerada no factor solar. No subcapítulo 5.3.2. é apresentado o ajuste deste valor.

5.3.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE: FACTOR SOLAR

Neste subcapítulo é feito uma pequena análise de sensibilidade sobre como o factor solar influencia os resultados da simulação.

O factor solar (g) do vão envidraçado é um valor que representa a relação entre a energia solar transmitida para o interior através do vão envidraçado em relação à radiação solar incidente na direcção normal ao envidraçado [27].

O valor adoptado para o factor solar é um valor teórico, pois não foi possível determinar na prática o factor solar real com a sujidade.

Assim, adoptou-se um valor teórico de 0,5. Esta redução permitirá observar com mais clareza a influência do factor solar no comportamento térmico da habitação.

A seguir apresentam-se os gráficos da comparação da temperatura para as medições e da simulação com o factor solar de 0,5 para todos os envidraçados:

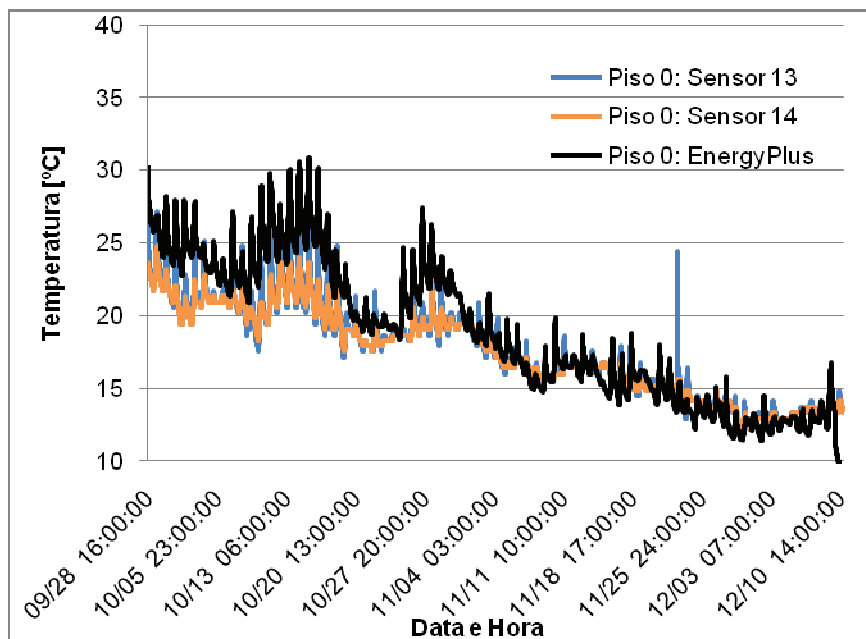


Fig.116 – Resultados da temperatura para o piso 0 e com $g=0,5$.

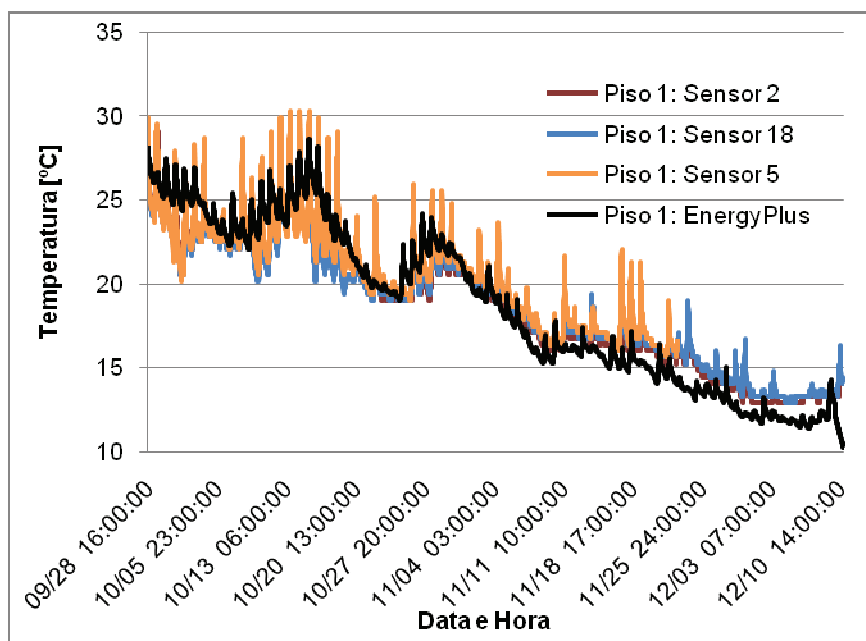


Fig.117 – Resultados da temperatura para o piso 1 e com $g=0,5$.

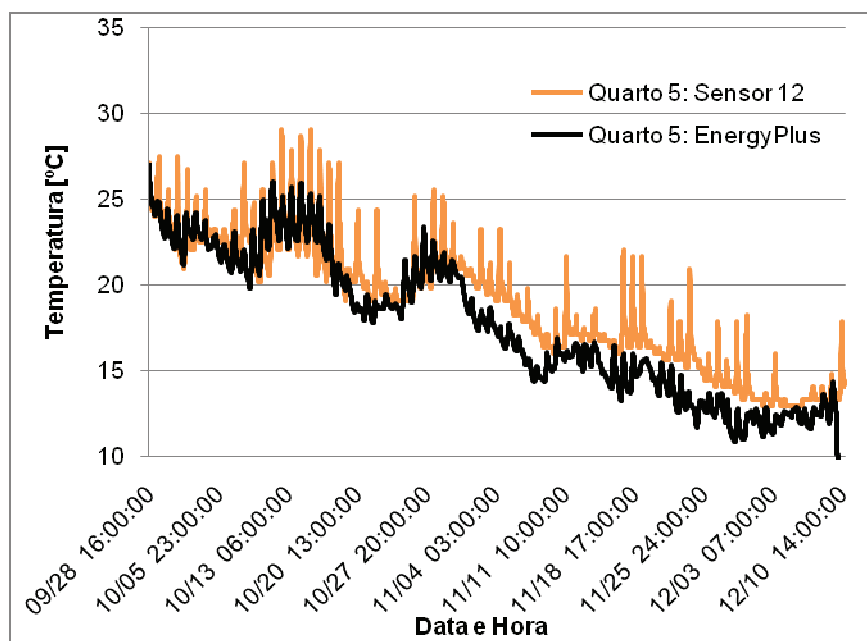


Fig.118 – Resultados da temperatura para o quarto 5 e com $g=0,5$.

Para o piso 0 observa-se que a redução do factor solar para 0,5 originou numa pequena aproximação das curvas para o início do período de medições e que a partir de Novembro, as curvas mantiveram-se próximas, pelo que se conclui que este valor é plausível para o piso 0.

Para o piso 1, tal como no caso da ventilação, houve uma aproximação das curvas no início do período de medições mas logo no início de Novembro, aquando das primeiras chuvas, as curvas afastam-se. Assim sendo, chega-se à conclusão que o valor 0,5 para o factor solar dos envidraçados do piso 1 é um valor reduzido, pelo que se deverá aumentar. Um valor plausível seria 0,65 ou 0,7 uma vez que no piso 1, a sujidade dos vidros não é tão visível.

A situação analisada para o piso 1 repete-se para o quarto 5. Logo o valor do factor solar deve ser igualmente aumentado de 0,5 para 0,65 ou 0,7.

5.3.3. NOTA FINAL SOBRE A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Como referido no início do subcapítulo 5.3., é feita apenas uma pequena análise de sensibilidade a fim de entender como a variação de dois parâmetros influencia os resultados da simulação.

Uma vez que, para se obter uma simulação que coincide com as medições, é necessário ajustar vários parâmetros em simultâneo, tal como a ventilação e o factor solar entre outros. Este ajuste origina numa grande variedade de combinações. Assim sendo, uma análise de sensibilidade mais completa e rigorosa poderá ser desenvolvida num trabalho posterior no âmbito deste tema.

5.4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM DIVERSOS FICHEIROS CLIMÁTICOS

Neste subcapítulo achou-se relevante mostrar como o uso dos diferentes tipos de ficheiros climáticos podem influenciar os resultados da simulação.

Para o gráfico a seguir, comparou-se as medições “*In Situ*” com os resultados das simulações, usando o ficheiro climático anual (*TMY*) e o ficheiro climático *Real-Time Weather*.

Como o ficheiro *Real-Time* só apresentava dados a partir do dia 28 de Setembro até ao dia 1 de Outubro, foi feita unicamente as simulações para esse mesmo período.

Como aqui se pretende mostrar a influência dos ficheiros climáticos na simulação, apresenta-se apenas a comparação de resultados para o quarto 5:

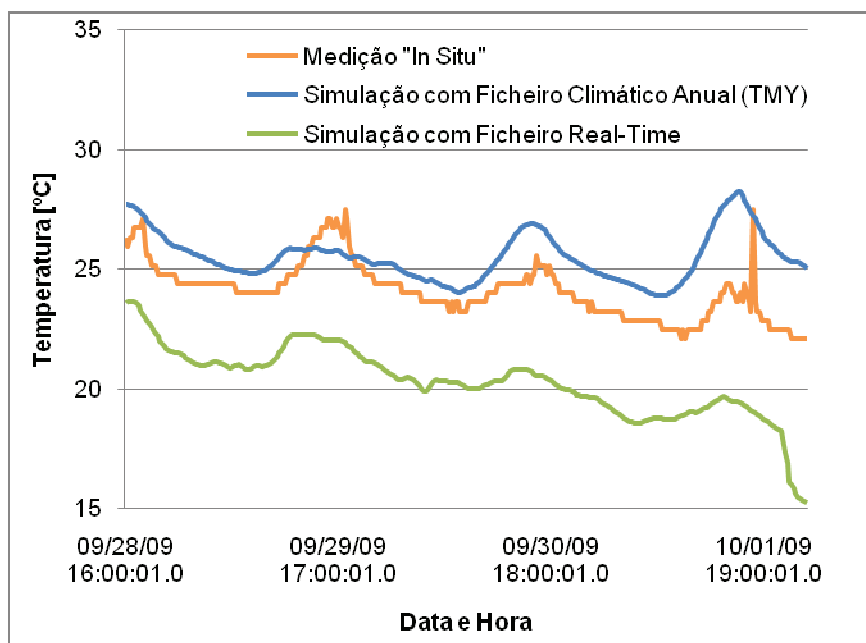


Fig.119 – Resultados de uma simulação com ficheiros climáticos vs medições.

Pela observação da Fig.119 repara-se que se obteve, com o ficheiro anual, temperaturas um pouco mais elevadas que as medições. Acontece o oposto com o ficheiro *Real-Time*. Obteve-se temperaturas mais baixas às das medições “*In Situ*”.

Uma vez que o ficheiro *Real-Time* não apresenta dados sobre a radiação solar do local, é de esperar que as temperaturas sejam mais baixas. Por sua vez, o ficheiro climático anual (*TMY*) contém informações para os meses mais representativos, logo também é de esperar que os resultados diferem das medições “*In Situ*”.

Conclui-se no geral, para o período simulado, os resultados da simulação com o ficheiro climático anual (*TMY*) diferem pouco com as medições “*In Situ*”.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

O trabalho desenvolvido nesta dissertação permitiu alcançar o objectivo principal desta dissertação, cumprindo os objectivos parciais definidos no início deste texto.

A modelação da habitação foi realizada com sucesso, pelo que se apresenta a seguir, algumas das principais conclusões tiradas ao longo deste trabalho:

- Este trabalho permitiu adquirir conhecimentos sobre a utilização do programa EnergyPlus;
- O estudo do caso 900FF permitiu validar a capacidade da autora desta dissertação em aprender a utilizar o programa EnergyPlus, obtendo resultados dentro do intervalo de resultados do BEStest. O estudo do caso 900FF permitiu a elaboração de uma descrição detalhada do programa para novos utilizadores;
- A aprendizagem do programa foi um desafio estimulante e interessante mas no entanto um processo complexo. A aprendizagem baseou-se na leitura do manual, fornecido juntamente com o programa e na resolução de alguns exercícios apresentados pelo manual do programa e pelo manual criado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) [7];
- Ao longo da aprendizagem do programa, foi detectada uma pequena falha sobre o manual. No ponto de vista de um utilizador inexperiente e que nunca teve uma formação sobre o seu funcionamento, havia por vezes a falta de uma explicação mais completa sobre alguns parâmetros ou até a falta de pequenos exemplos que permitem esclarecer algumas dúvidas. Por vezes, o manual explica que, para um determinado campo, é necessário preencher esses mesmos campos com valores. Mas o manual não especifica qual o intervalo possível de valores nem explica o significado dos valores a introduzir. Só utilizadores experientes que têm sensibilidade sobre esses valores é que podem, com precisão, preencher estes campos;
- As medições “In Situ” obtidas através dos sensores HOBO foram muitos satisfatórios e plausíveis. Em geral, os sensores mostraram-se bastante fiáveis e de simples de utilização;
- Em relação às medições dos sensores, obteve-se os seguintes valores:

Piso 0: Temperatura – (máx: 27,1 °C; mín: 11,4 °C; méd: 17,5 °C)

Piso 1: Temperatura – (máx: 30,3 °C; mín: 12,9 °C; méd: 18,5 °C)

Humidade relativa – (máx: 78 %; mín: 31,9 %; méd: 67,1 %)

Quarto 5: Temperatura – (máx: 29,1 °C; mín: 12,9 °C; méd: 18,9 °C)

Exterior: Temperatura – (máx: 22,5 °C; mín: 8,2 °C; méd: 16,1 °C)

Humidade relativa – (máx: 91,7 %; mín: 23,4 %; méd: 77,7 %)

Conclui-se então que, de uma forma geral, a habitação apresentava uma temperatura média de 18 °C para o período medido e que, embora só se mediu a humidade relativa num quarto do piso 1, a média da humidade relativa deverá rondar os 67 % na habitação;

- Graças às medições obtidas pela Estação Meteorológica do LFC - FEUP, foi possível criar um ficheiro climático com dados reais para a zona do Porto;
- As medições obtidas pela estação climática apresentaram um desenvolvimento semelhante às obtidas por um sensor colocado no exterior embora as medições da estação apresentassem picos mais elevados. Esta situação pode ser explicado devido ao sensor estar, no período de medição, num local que não correspondia exactamente à uma situação de clima exterior. Apesar da estação se situar a aproximadamente 6 km da habitação, conclui-se que os dados obtidos são fiáveis;
- De uma forma geral, a simulação obtida é próxima da realidade, pelo que se conclui que a modelação da habitação foi um sucesso. No entanto é possível melhorar a simulação da habitação, variando alguns parâmetros;
- Conclui-se que ao aumentar a taxa de renovação horária ou reduzir o valor do factor solar, se obtém uma melhor aproximação das curvas das temperaturas da simulação com as medições para o piso 0. Justifica-se na prática porque a habitação não se encontrava fechada, logo havia um maior fluxo de ar, logo o valor de 0,8 h⁻¹ pode ser subestimado para o piso 0. O mesmo acontece com o factor solar. Assim, ao reduzir o valor de 0,75 para 0,5, a radiação recebida na habitação vai ser menor, logo as temperaturas na zona não serão tão altas.

Assim conclui-se que na redução de cerca de 35 % do factor solar para o piso 0, obteve-se um melhoramento significativo dos resultados e que para as restantes zonas, a redução tem de ser inferior a 35 %. Em relação à ventilação natural, conclui-se que para haver um melhoramento significativo dos resultados da simulação, seria necessário um aumento de 150 % para o piso 0, de 50 % para o piso 1 e 0 % para o quarto 5. Refere-se que os resultados da simulação podem ser ainda melhorados, ajustando em simultâneo os dois parâmetros referidos de forma a obter uma simulação que se aproxima o melhor possível com as medições "In Situ";

- A utilização do ficheiro climático criado a partir dos dados obtidos pela estação permitiu obter uma simulação que se aproximasse da realidade. Na ausência de dados reais obtidos através de uma estação meteorológica, aconselha-se o uso de um ficheiro climático *Real-Time Weather* completo. Caso este não esteja completo, usar o ficheiro climático anual (*TMY*) para a cidade em estudo;
- De uma forma geral, os resultados obtidos através da simulação base foram muitos satisfatórios e credíveis, pelo que se pode validar o programa EnergyPlus.

Para finalizar este trabalho, conclui-se que, embora exista parâmetros desconhecidos e como tal foram arbitrados, a simulação foi um sucesso. Obteve-se resultados próximos da realidade e sendo assim, pode-se validar a modelação da habitação unifamiliar em estudo com o programa EnergyPlus.

A futura variação dos parâmetros arbitrados permitirá obter um melhoramento nos resultados aqui obtidos nesta dissertação.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como referido acima, obteve-se resultados próximos da realidade.

No entanto, a simulação pode ser melhorada variando certos parâmetros. O ajuste da simulação pode ser feito variando um ou vários parâmetros individualmente ou em simultâneo.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação pode seguir diversos caminhos a fim de se obter uma simulação com resultados praticamente iguais às das medições. Para desenvolvimento de trabalhos futuros, vários parâmetros podem ser ajustados ou alterados, tais como:

- Variação da taxa de renovação horária (ventilação natural);
- Características dos envidraçados e clarabóias;
- Materiais de construção utilizados;
- Parâmetros climáticos num ficheiro climático;
- Introdução de ganhos internos;
- Introdução de equipamentos;
- Introdução de sistemas de sombreamento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] RCCTE, *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*, Decreto de Lei nº 80, de 4 de Abril de 2006, Porto Editora, Porto, 2006.
- [2] EnergyPlus™. *Getting Started with EnergyPlus*. In *EnergyPlus Documentation Main Menu*, pp. 1, 2009.
- [3] Pereira, C.D, Ghisi, E. *Calibração de um Modelo Computacional de uma Residência Unifamiliar Localizada em Florianópolis*, pp. 1 a 10, 2009.
- [4] EnergyPlus: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>. Setembro a Dezembro 2009.
- [5] Scarduelli, F.A., Westphal, F.S., Lamberts, R. *Aplicação do Método BEStest no EnergyPlus para Treinamento em Simulação do Desempenho Térmico de Edificações*, pp. 1797 a 1805, 2005.
- [6] EnergyPlus Development Team, *EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-200*, 2009.
http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/energyplus_ashrae_140_envelope.pdf. Outubro 2009.
- [7] Melo, A.P, Matos, M. *Apostila do Curso Básico do Programa EnergyPlus*, pp. 1 a 24, Setembro de 2009. http://www.labeee.ufsc.br/pos-graduacao/ecv_4202/Apostila_Labeee.pdf. 8 de Dezembro de 2009.
- [8] Lusoduplo: <http://www.lusoduplo.com.pt/vd-lusoclima.html>. Novembro de 2009.
- [9] Construlink: http://www.construlink.com/LogosCatalogos/sgg_vidro_capa_reflectasol_2009.pdf. Novembro de 2009.
- [10] Santos, C., Matias, L. *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*, ITE 50, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2006.
- [11] ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *ASHRAE Handbook – Fundamentals*, pp. 39.1 a 39.4, Atlanta, 2005.
- [12] Engineering ToolBox: http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html. Setembro de 2009.
- [13] MSPC: http://www.mspc.eng.br/ciemat/cmat210.shtml#cesp_de_mat. Dezembro de 2009.
- [14] UFSC: http://www.eps.ufsc.br/disserta96/suely/cap3/cap3_sue.htm. Dezembro de 2009.
- [15] RCCTE, *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*, Artigo 3.2 do Anexo IV, Decreto de Lei nº 80, de 4 de Abril de 2006, Porto Editora, Porto, 2006.
- [16] Boxcar Software for Hobo Data Logger. *Pacific Gas and Electric Company*, Pacific Energy Center, www.pge.com/pec.
- [17] Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Typical_meteorological_year. Dezembro de 2009.
- [18] PVCDROM: <http://pvcdrum.pveducation.org/SUNLIGHT/TMY.HTM>. Dezembro de 2009.
- [19] EnergyPlus: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/weatherdatainformation.pdf>. Janeiro de 2010.
- [20] EnergyPlus: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm. Dezembro de 2009.

- [21] EnergyPlus:
http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weatherdata/weather_request.cfm. Dezembro de 2009.
- [22] FEUP: <http://paginas.fe.up.pt/~lfc-scc/estacao.html>. Dezembro de 2009.
- [23] Estação Meteorológica: <http://experimenta.fe.up.pt/estacaometeorologica/galeria.php?lang=pt>. Janeiro de 2010.
- [24] Peixoto de Freitas, V., da Silva Pinto, P. *Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção – Condensações Internas*, Nota de Informação Técnica – NIT 002 – LFC 1998, pp. 13, Laboratório de Física das Construções, 1998.
- [25] Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Dew_point. Dezembro de 2009.
- [26] Rodrigues, A.M., Canha da Piedade, A., Braga, A.M. *Térmica de Edifícios*, pp. 68 a 75, Edições Orion, Amadora, 2009.
- [27] RCCTE, *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*, Artigo 4.3.2 do Anexo IV, Decreto de Lei nº 80, de 4 de Abril de 2006, Porto Editora, Porto, 2006.